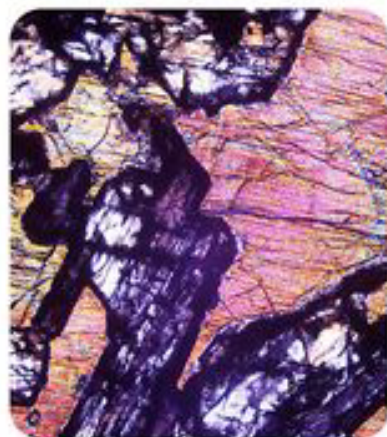




ISSN 2712-7761

№ 7 (355), июль 2024

Вестник геонаук





Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Июль
July
2024,
№ 7 (355)

Журнал издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН
The journal is published under the research and methodological guidance of the RAS Department of Earth Sciences

Главный редактор А. М. Асхабов

Зам. главного редактора И. Н. Бурцев

Зам. главного редактора О. Б. Котова

Ответственный секретарь И. В. Козырева

Chief Editor A. M. Askhabov

Deputy Chief Editor I. N. Burtsev

Deputy Chief Editor O. B. Kotova

Executive Secretary I. V. Kozyreva

Редакционный совет

Л. Н. Андричева, Сыктывкар, Россия
А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
Т. М. Безносова, Сыктывкар, Россия
М. А. Богдасаров, Брест, Беларусь
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Апатиты, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
В. А. Жемчугова, Москва, Россия
А. В. Журавлев, Сыктывкар, Россия
В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. И. Николаев, Апатиты, Россия
Б. М. Осовецкий, Пермь, Россия
Ю. Ф. Патраков, Кемерово, Россия
И. В. Пеков, Москва, Россия
Д. В. Пономарев, Сыктывкар, Россия
В. Н. Пучков, Екатеринбург, Россия
Д. Ю. Пуцаровский, Москва, Россия
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
Ш. Сун, Мянъян, Китай
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия
М. А. Федонкин, Москва, Россия
А. Г. Шеломенцев, Владивосток, Россия

Технический редактор Г. Н. Каблис

Заведующий редакцией Т. А. Некучаева

Editorial Board

L. N. Andreicheva, Syktyvkar, Russia
A. I. Antoshkina, Syktyvkar, Russia
T. M. Beznosova, Syktyvkar, Russia
M. A. Bogdasarov, Brest, Belarus
M. A. T. M. Broeckmans, Trondheim, Norway
D. A. Bushnev, Syktyvkar, Russia
Yu. L. Voytekhevsky, Apatity, Russia
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia
V. A. Zhemchugova, Moscow, Russia
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia
V. A. Kashirtcev, Novosibirsk, Russia
M. Komac, Ljubljana, Slovenia
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
M. Martins, Ouro Preto, Brazil
T. P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
P. Männik, Tallinn, Estonia
A. I. Nikolaev, Apatity, Russia
B. V. Osovetsky, Perm, Russia
Yu. F. Patrakov, Kemerovo, Russia
I. V. Pekov, Moscow, Russia
D. V. Ponomarev, Syktyvkar, Russia
V. N. Puchkov, Yekaterinburg, Russia
D. Yu. Pushcharovsky, Moscow, Russia
A. M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Sh. Sun, Mianyang, China
C. M. Soja, Hamilton, NY, USA
O. V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
M. A. Fedonkin, Moscow, Russia
A. G. Shelomentsev, Vladivostok, Russia

Technical Editor G. N. Kablis

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 (2023) – 0.425



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 (2023) – 0.425

geo.komisc.ru/vestnik

Содержание	Content
Научные статьи	Scientific articles
Флюидный режим образования вторичных доломитов в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения (вал Гамбурцева) <i>Т. В. Майдль, Н. В. Сокина, М. С. Нечаев, И. Л. Ульниров, С. И. Исаенко</i> 3 Характер матрикса — индикатор температурных условий формирования зювитов (на примере обломочных импактитов Карского метеоритного кратера) <i>Н. И. Максименко, Т. Г. Шумилова</i> 13 Серпентиниты зоны меланжа на севере массива Рай-Из, вмещающие ювелирный гранат (андрадит-демантоид) <i>В. П. Лютое, А. Б. Макеев, Ю. С. Симакова, Е. Н. Терехов</i> 24 Репрезентативность фондов Геологического музея им А. А. Чернова для изучения бокситообразования на Тимане <i>Л. Р. Жданова, И. С. Астахова</i> 32 2000 лет со дня рождения Плиния Старшего <i>Ю. Л. Войтеховский</i> 41	Fluid regime of secondary dolomite formation in Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey deposit (Gamburtsev swell) <i>T. V. Maydl, N. V. Sokerina, M. S. Nechaev, I. L. Ulnyrov, S. I. Isaenko</i> 3 Matrix nature is an indicator of temperature conditions of suevite formation (on the example of clastic impactites of the Kara meteorite crater) <i>N. I. Maksimenko, T. G. Shumilova</i> 13 Serpentinities of the melange zone in the north of the Ray-Iz massif, hosting gem garnet (andradite-demantoid) <i>V. P. Lyutoev, A. B. Makeyev, Yu. S. Simakova, E. N. Terekhov</i> 24 Representativeness of the funds of the A. A. Chernov Geological Museum for the study of bauxite formation on Timan <i>L. R. Zhdanova, I. S. Astakhova</i> 32 2000 years since the birth of Pliny the Elder <i>Yu. L. Voytekhovsky</i> 41
Хроника, события, факты. История науки	Chronicle, events, facts. History of Science
33-я Всероссийская научная конференция «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента» (анонс) 48	The 33rd All-Russian Scientific Conference «Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment» (announcement) 48

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552.54:552.14:553.08

DOI: 10.19110/geov.2024.7.1

Флюидный режим образования вторичных доломитов в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения (вал Гамбурцева)

Т. В. Майдль, Н. В. Сокерина, М. С. Нечаев, И. Л. Ульныров, С. И. Исаенко

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

Актуальность исследования определяется поиском залежей углеводородов в отложениях нижнепалеозойского комплекса, с которым связаны основные перспективы прироста запасов Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, и разработкой прогноза строения резервуаров комплекса на основе лучшего понимания процессов формирования карбонатных коллекторов.

Целью исследования является получение данных о параметрах флюидного режима образования вторичных доломитов в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения (вал Гамбурцева). Для этого были изучены первичные флюидные включения в доломитовых и ангидритовых цементах выполнения каверновых пустот пород-коллекторов.

В результате исследования установлено, что включения содержат до 10 об. % газовой фазы, которая представлена метаном и парами воды. Жидкая фаза характеризуется существенно хлоридно-кальциевым составом, солёность равна 13.5–23.5 мас. % NaCl-экв. Приведенные данные могут указывать на образование каверн и цемента вторичных доломитов из умеренно-температурных растворов высокой солёности, которые образуются в результате смешения седиментационных (первично морских) вод и рассолов гидротермальных источников. Продукты растворения эвапоритов в присутствии углеводородов и процессы восстановления сульфатов являются наиболее вероятным источником и поставщиком флюидов, как образования в породе каверн выщелачивания, так и выполняющих их цемента. Флюиды могли поступать в верхние этажи разреза из гидротермальных источников зон фундамента и нижних горизонтов осадочного чехла по системе разломов и трещин во время тектонической активизации.

Ключевые слова: *гомогенизация, криотермометрия, флюидные включения, вторичный доломит, карбонатный резервуар*

Fluid regime of secondary dolomite formation in Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey deposit (Gamburtsev swell)

T. V. Maydl, N. V. Sokerina, M. S. Nechaev, I. L. Ulnyrov, S. I. Isaenko

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The search for hydrocarbon deposits in the sediments of the Lower Paleozoic complex of the Timan-Pechora oil and gas province, which are associated with the main prospects for increasing reserves, is a relevant topic for research. It is necessary to understand the formation processes of carbonate reservoirs within the complex under consideration to develop a strategy for predicting the structure of the complex reservoirs.

Obtaining data on the parameters of the fluid regime of the formation of secondary dolomites in the Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey field (Gamburtsev swell) was the aim of the study. We studied primary fluid inclusions in dolomite and anhydrite cements filling voids in reservoir rocks.

We showed that the inclusions contained up to 10 vol. % of the gas phase, which was represented by methane and water vapor. The liquid phase was characterized by a substantially chloride-calcium composition, the salinity is 13.5–23.5 wt. % NaCl-eq. These data might indicate the formation of cavities and cements of secondary dolomites from moderate-temperature solutions of high salinity, which were formed as a result of mixing sedimentation (primary marine) waters and brines of hydrothermal vents. The products of evaporite dissolution in the presence of hydrocarbons and sulfate reduction processes were the most likely source and supplier of the fluids, both the formation of leaching caverns in the rock and the cements performing them. Fluids could enter the upper floors of the section from hydrothermal sources in the basement zones and lower horizons of the sedimentary cover through a system of faults and cracks during tectonic activation.

Keywords: *homogenization, cryothermometry, fluid inclusions, secondary dolomite, carbonate reservoir*

Для цитирования: Майдль Т. В., Сокерина Н. В., Нечаев М. С., Ульныров И. Л., Исаенко С. И. Флюидный режим образования вторичных доломитов в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения (вал Гамбурцева) // Вестник геонаук. 2024. 7(355). С. 3–12. DOI: 10.19110/geov.2024.7.1

For citation: Maydl T. V., Sokerina N. V., Nechaev M. S., Ulnyrov I. L., Isaenko S. I. Fluid regime of secondary dolomite formation in Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey deposit (Gamburtsev swell). Vestnik of Geosciences, 2024, 7(355), pp. 3–12, doi: 10.19110/geov.2024.7.1

Введение

Породы-коллекторы продуктивных толщ S_2-D_1 северо-востока Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции представлены практически исключительно вторичными доломитами, в формировании пустотного пространства которых принимают участие поры, каверны и трещины (Майдль, 1989; Душин и др., 2016; Жемчугова, Маслова, 2020; Ульныров, Майдль, 2023). Коллекторские параметры в доломитовых породах сильно варьируются, и зависят от прохождения процессов доломитизации и/или рекристаллизации относительно исходной кристаллической структуры и образования вторичной пористости. Палеозойские доломиты часто более пористые, чем связанные с ними известняки. Последовательность процессов и относительное время доломитизации важны для понимания происхождения пористости в любом конкретном теле доломитов.

Крупные доломитовые тела — обычное явление в горных породах, и большинство исследователей считают их результатом реакции замещения с участием поровых вод, привнесом Mg и удалением Ca (Land, 1985; Hardie, 1987). В последние годы возрастает понимание того, что замещающая доломитизация требует не только благоприятных геохимических условий, но и эффективного механизма циркуляции потоков жидкости. И большинство современных моделей генезиса массивных доломитов по существу являются гидрологическими (Machel, 2004).

Проблема прогноза геометрии доломитовых тел, их связности и распределения в них коллекторских свойств решается с помощью двух- и трехмерных количественных моделей реактивного транспорта (RTM). Они объединяют геохимические условия и реакции с характером флюидных потоков и основаны на исследовании процессов доломитизации и связанных с ними диагенетических реакций карбонатов. Существующие модели можно дифференцировать по трем фундаментальным драйверам, которые управляют циркуляцией флюидов, необходимых для доломитизации: высотный (топографический) градиент напора метеорной и/или морской воды; градиент плотности жидкости из-за изменений солености и/или температуры; градиент давления седиментационного и/или тектонического уплотнения. Потоки жидкости (циркуляция) обычно являются продуктом одновременного воздействия нескольких различных движущих сил. К настоящему времени разработаны модели доломитизации для четырех различных гидрогеологических систем: 1) рефлюкса рассола, 2) зоны смещения, 3) геотермальной циркуляции и 4) гидротермальной циркуляции, контролируемой разломами (Machel, 2004; Whitaker, Smart, Jones, 2004; Benjakul R. et al., 2020).

Характер доломитизации пород определяет их коллекторские свойства, поэтому моделирование активно внедряется в практику разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений. От качества «первичных» данных о параметрах флюидов зависят и выбор концепции моделирования эпигенетических процессов, и точность прогноза распространения «улучшенных» коллекторов. Одним из главных поставщиков таких данных являются включения первичных растворов в растущих кристаллах, исследование кото-

рых позволяет судить о составе и температуре растворов, участвующих в преобразованиях породы-коллектора.

Представленная работа является первым опытом микротермометрического анализа флюидных включений в доломитовых коллекторах нашего региона. Целью работы являлось установление состава и температурного режима минералообразующих сред, сохранившихся в доломитовом и ангидритовом цемен-тах трещиновато-кавернозных доломитов Хасырейского месторождения вала Гамбурцева.

Методы исследований

Исследования литологического состава и пустотного пространства образцов пород проводились с помощью микроскопа Leica DM-2700 M, а также на электронном микроскопе TESCAN VEGA3 LMN, оснащенном энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) «Oxford Instruments X-Max 50 мм²» (ЦКП «Геонаука», г. Сыктывкар). Анализ изотопов углерода и кислорода проведен в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на масс-спектрометре DELTA V Advantage. Значения изотопных коэффициентов определялись по стандартам PDBNBS18 и NBS19 (TS-limestone) для углерода и SMOW — для кислорода. Погрешность определения обоих коэффициентов не превышала ± 0.1 ‰.

Изучение флюидных включений проведено в двух образцах из керна скв. 35-Хасырейская, отобранных из нижнедевонской и верхнесилурийской толщ.

Анализировались включения ромбоэдрического доломитового и позднего ангидритового цементов. Для выяснения генезиса вторичной минерализации в двусторонне полированных пластинах проводилось изучение флюидных включений методами гомогенизации и криометрии с использованием термо-криостатика THMSG600 фирмы Linkam. Погрешность измерений ± 0.2 °C при отрицательных температурах и ± 0.5 °C при положительных. Соленость растворов во включениях измерялась по температуре плавления льда (Bodnar, Vityk, 1994). Солевой состав включений определялся по температуре эвтектики водно-солевой системы (Борисенко, 1977). Газовый состав индивидуальных включений изучался частично на высокораз-решающем рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon) при комнатной температуре. Для регистрации спектров применялась решетка спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия составлял 300 и 500 мкм, щель — 100 мкм, мощность возбуждающего излучения He-Ne лазера (длина волны 632.8 нм) — 20 мВт, Ar⁺ лазера — 120 мВт (514,5 нм). Изучение флюидных включений проводилось в двусторонне полированных пластинах толщиной 0.3–0.5 мм. Часть спектров получена на рамановском микроскопе Ramos M520 (SOL instruments, Беларусь). Параметры регистрации спектров: твердотельный лазер (выходная мощность 80 мВт, $\lambda = 532$ нм), решетка спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия — 100 мкм, объектив $\times 50$ (микроскоп Nexcore NE910, Китай), время накопления сигнала — 10 секунд, количество измерений на одном участке спектрального диапазона — 1. Регистрация спектров осуществлялась при комнатной температуре.



Геологическое положение и литологическая характеристика

Хасырейское месторождение приурочено к одноименному локальному поднятию вала Гамбурцева, расположенному в центральной части Варандей-Адзвинской структурно-тектонической зоны (ВАСЗ) (рис. 1). Ее современный структурный план сложился в результате разнонаправленных субвертикальных и субгоризонтальных движений, тесно связанных с заложением и геологической эволюцией Уральской и Пай-Хойско-Новоземельской складчатых систем (Малышев, 2002). Вал Гамбурцева представляет собой серию расположенных кулисами чрезвычайно узких

складок с относительно плоскими сводами, ограниченными дизъюнктивными нарушениями с запада и востока (Сотникова, 2009).

В составе нижнедевонских отложений (D_1) вала Гамбурцева выделяются три пачки (снизу вверх): доломитовая (D_1dol) в овинпармском горизонте, глинисто-доломитовая, ангидрито-доломитовая в сотчем-кыртинском горизонте. Покрышкой залежей являются плотные аргиллиты, мергели тиманского и саргавского горизонта верхнего девона.

На Хасырейском месторождении в составе пачки D_1dol выделяется ряд интервалов, породы которых различаются морфологией пустотного пространства и литолого-петрофизическими свойствами (рис. 2).

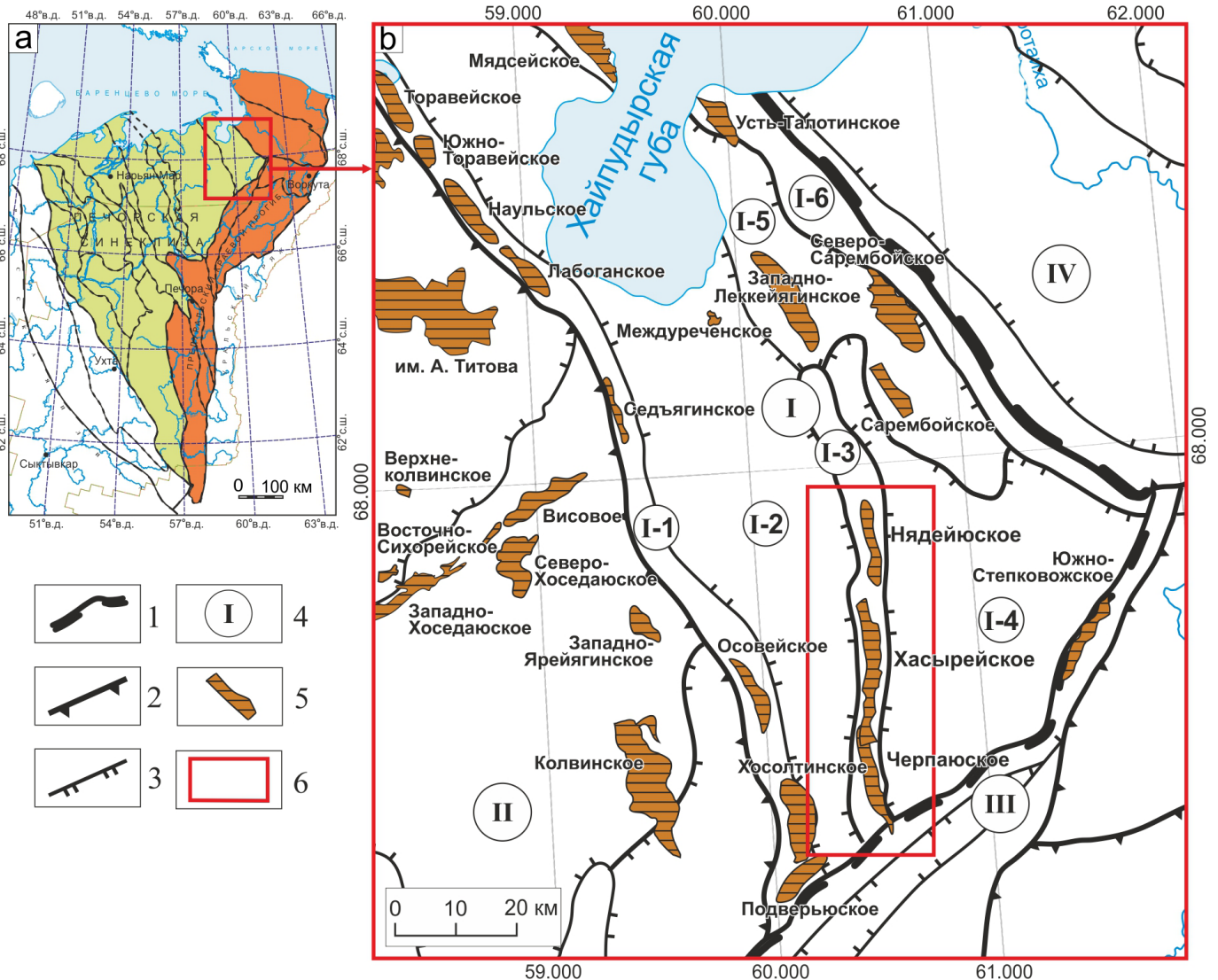


Рис. 1. Обзорно-тектоническая карта района исследования: а — обзорная карта Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, б — карта тектонического районирования Варандей-Адзвинской структурной зоны (Белонин и др., 2004). Условные обозначения: 1–3 — границы тектонических элементов: 1 — надпорядковых, 2 — первого порядка, 3 — второго порядка; 4 — номера тектонических элементов: I — Варандей-Адзвинская структурная зона (I-1 — Вал Сорокина, I-2 — Морейская депрессия, I-3 — Вал Гамбурцева, I-4 — Верхнеадзвинская депрессия, I-5 — Сарембой-Леккейягинский вал, I-6 — Талотинский вал), II — Хорейверская впадина, III — Гряда Чернышева, IV — Коротайхинская впадина; 5 — нефтяные месторождения; 6 — район работ

Fig. 1. Overview-tectonic map of the research area: а — overview map of the Timan-Pechora oil and gas province, б — map of the tectonic zoning of the Varandey-Adzva structural zone (Belonin et al., 2004).

Symbols: 1–3 — boundaries of tectonic elements: 1 — superorder, 2 — first order, 3 — second order; 4 — numbers of tectonic elements: I — Varandey-Adzva structural zone (I-1 — Sorokin swell, I-2 — Morey depression, I-3 — Gamburtsev swell, I-4 — Upper Adzva depression, I-5 — Sarembay-Lekkeyaga swell, I-6 — Talota swell), II — Khoreyver depression, III — Chernyshev Ridge, IV — Korotaykha depression; 5 — oil fields; 6 — work area

Развитая в толще сеть трещин вторичной пористости и каверн способствует не только связности пластов пород-коллекторов овинпармского горизонта, но и (исходя из гидродинамики залежи) связывает их с силурийскими отложениями. Наиболее продуктивными являются отложения двух литологических типов. Первый тип представляют среднезернистые доломиты с низким содержанием глинистого материала и развитой межзерновой пористостью с доломитизацией (рис. 2, а), часто приуроченной к зонам развития микротрещин (рис. 2, с).

Второй тип пород-коллекторов формируют доломиты замещения отложениями нижней сублиторали. Они имеют первично известковый состав с крупными остатками колоний и раковин «рассеянных» в иловой матрице (рис. 2, b, c), относимых к отложениям нижней сублиторали. Доломитизация ила проходила относительно равномерно и привела к его замещению плотным агрегатом тонко-мелкозернистого доломита. Раковины и крупные обломки табулят, строматопорат обычно не образуют скоплений с «каркасной структурой», а погружены в иловую массу. Они преобразовывались по иным сценариям и в более поздние сроки. Их остатки либо полностью, либо частично замещены доломитом и кремнием, либо выщелочены до

образования каверн, немного заполненных цементами крупнокристаллического доломита (рис. 2, d-h), иногда с кристаллами ангидрита. Аналогичные цементы заполняют также зоны дробления пород и трещины (рис. 2, i). Кристаллы доломита часто имеют зональное, подчеркнутое обилием включений, или блочное строение. Встречаются кристаллы «седловидной» формы (рис. 2, f). В ряде случаев грани кристаллов демонстрируют отчетливые следы растворения (рис. 2, e, h).

Среди вторичных доломитов выделяются несколько морфоструктурных разновидностей, сохраняющих реликты или полностью замещающих первичные структуры известняков. Микроскопическое и электронно-микроскопическое исследования позволяют выделить две-три генерации доломитов, отличающихся размером и морфологией, а часто и составом примесей. Доломиты первой и отчасти второй генерации характеризуются несколько повышенным содержанием кальция. Кристаллы второй генерации, слагающие зоны и участки рекристаллизации, демонстрируют незначительную примесь железа при недостатке магния. Содержание атомов железа составляет 0.2–0.5 ат. %. Третья генерация, представленная крупными кристаллами доломитовых цементов, часто содержит уже от 1.4 % до 9.8 ат. % железа, обогащающих внешние зоны

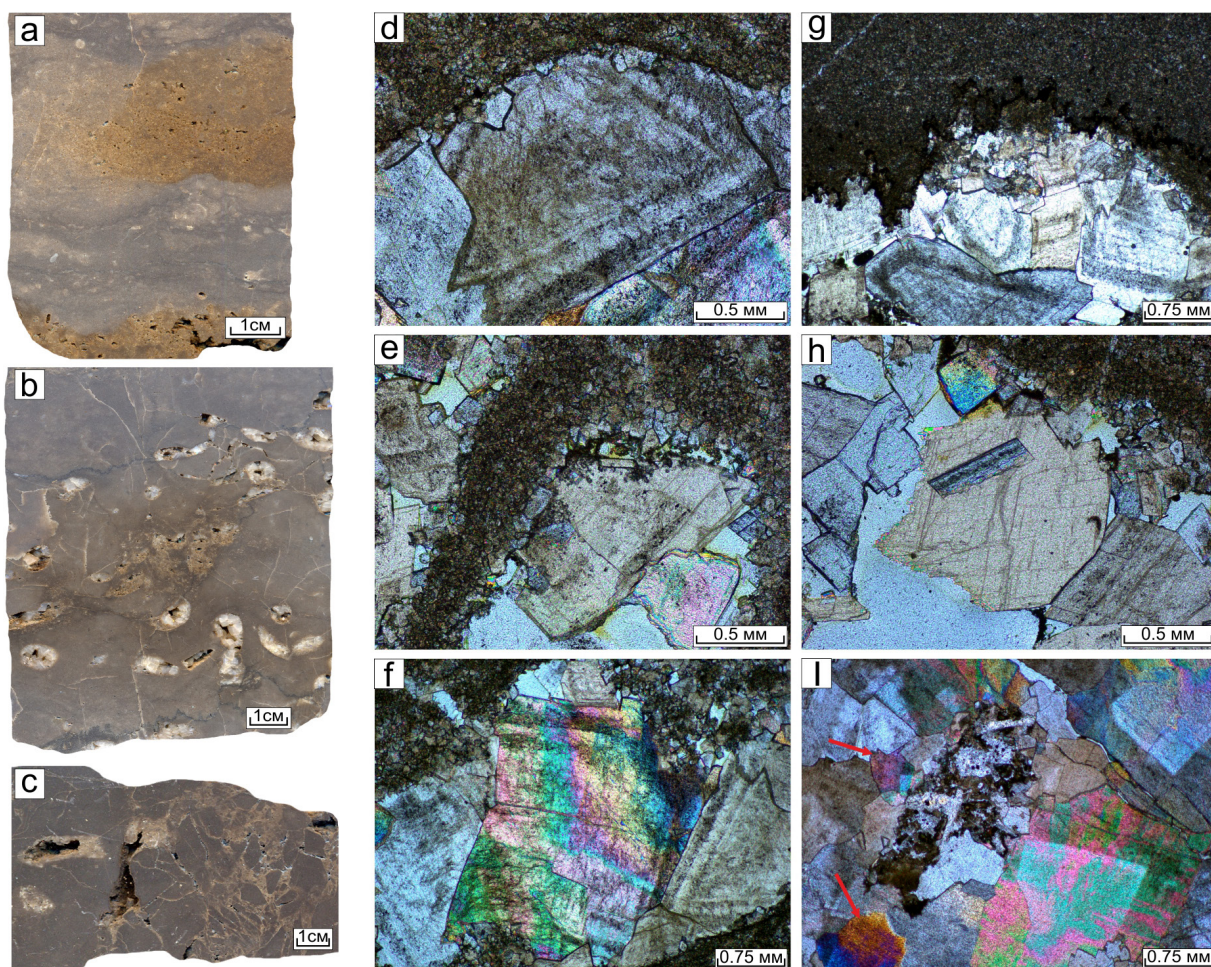


Рис. 2. Фото пор, трещин и каверн в образцах и микрофотографии доломитовых и ангидритодоломитовых цементов пород-коллекторов доломитовой пачки скв. 35-Хасырейская (гл. 2300–2376,6 м.): а — обр. 7/1; б — обр. 10/2; в — обр. 5/2; фото шлифов: обр. d–h — обр. 10/2; i — обр. 8/6. Красные стрелки указывают на зерна ангидрита. Пояснения в тексте

Fig. 2. Photos of pores, cracks and caverns in samples and microphotographs of dolomite and anhydrite-dolomite cements of reservoir rocks of the dolomite member of well 35-Khasyreyskaya (int. 2300–2376.6 m.): а — sample 7/1; б — sample 10/2; в — sample 5/2; photo of thin sections: d–h — sample 10/2; i — sample 8/6. Red arrows indicate anhydrite grains. Explanations are in the text

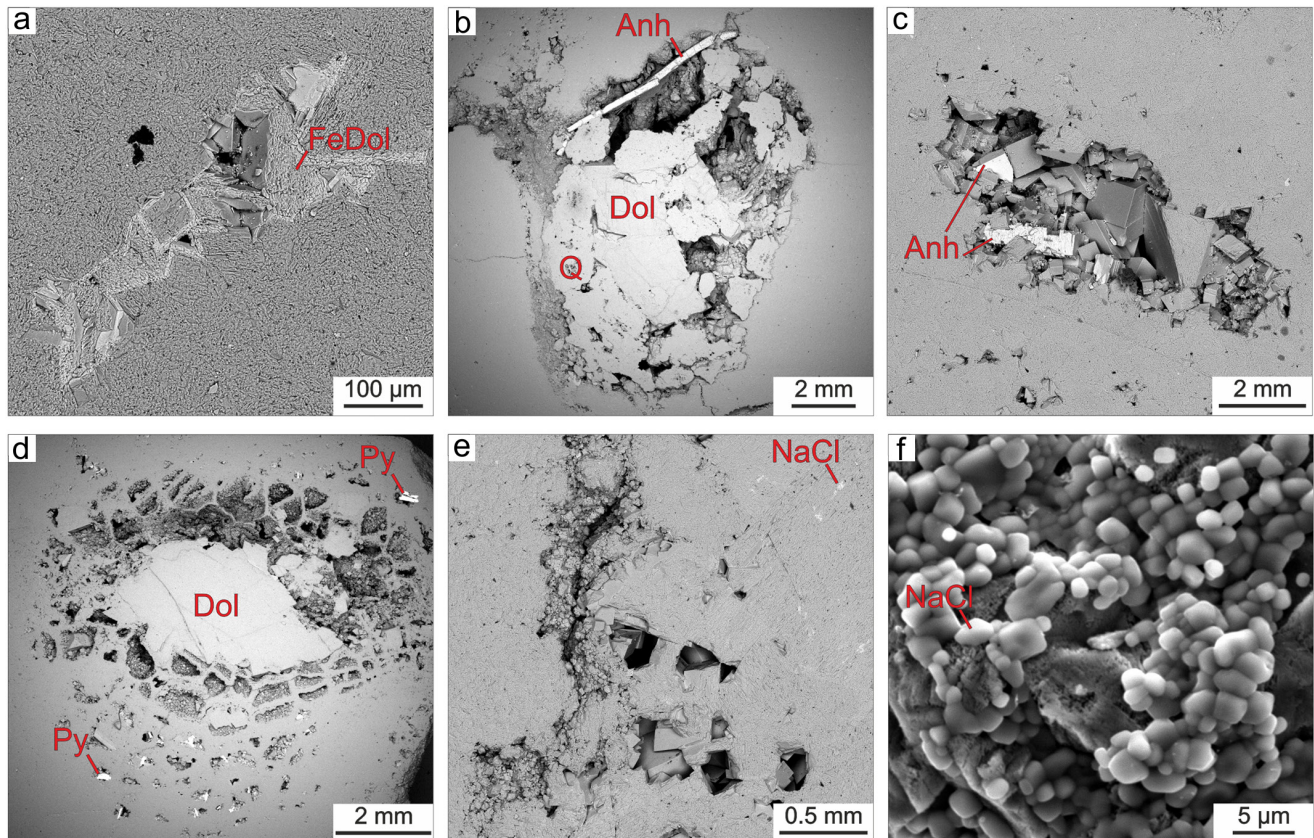


Рис. 3. Электронно-микроскопическое исследование процессов вторичной минерализации.

Вторичные доломитовые цементы в пустотах выщелачивания: доломит, цементирующий пустоты, содержит примесь железа и отличается более ярким отражением кристаллов или зон кристаллов, чем доломиты матрикса (a–d); выделения в полостях каверн кристаллических агрегатов ангидрита (b, c), кремния (b) и пирита (d); вторичные поры доломитизации и выделения хлористого натрия в матриксе (e); хлористый натрий на поверхности доломита (f). Снимки a–e — в режиме отраженных электронов

Fig. 3. Electron microscopic study of secondary mineralization processes.

Secondary dolomite cements in leaching voids: dolomite cementing the voids contains an admixture of iron and is characterized by a brighter reflection of crystals or zones of crystals than matrix dolomites (a–d); precipitation of crystalline aggregates of anhydrite (b, c), silicon (b) and pyrite (d) in the cavities; secondary pores of dolomitization and release of sodium chloride in the matrix (e); sodium chloride on the surface of dolomite (f); pictures a–e — in the mode of reflected electrons

кристаллов (рис. 3, a). В меньшем количестве в цементных заполнениях присутствуют кристаллы ангидрита, обычно более поздние, чем доломитовые (рис. 3, b, c).

Цементы лишь частично заполняют пустоты, оставляя некоторый объем пространства свободным. Достаточно часто встречаются микроскопления кристаллов галита, выполняющих микротрещины и микропоры в доломитах (рис. 3, e, f). Это позволяет связывать их генезис с глубинными растворами, подпитываемыми рассолами погруженных соленосных толщ ордовика. Выделения пирита иногда имеют необычную пластинчатую форму зерен, выполняющих узкие промежутки между кристаллами доломита. Иногда сохраняются зерна с равным содержанием атомов железа и серы, возможно, реликты-свидетели изменений окислительно-восстановительных обстановок и редукции сульфатов.

Цементы, частично заполняющие каверны и пустоты расширения трещин из «рыхлых» агрегатов крупных кристаллов доломита с ровными или искривленными «седловидными» поверхностями граней, большинство исследователей связывают с геотермальными или гидротермальными растворами. Любые растворы, поступающие из нижних горизонтов осадоч-

ного чехла, имеют повышенную относительно вмещающих пород температуру и могут рассматриваться как геотермальные (Whitaker, Xiao, 2010). Подтверждением этому считают явное пространственное совпадение процессов цементации, пустот выщелачивания и трещиноватости пород (Davies, Smith, 2006; Du et al., 2018; Warren, 2019). Для суждения о генезисе доломитовых цементов, отнесении их к продуктам геотермальных или гидротермальных флюидов нужны данные, позволяющие судить о температурном режиме их образования. С этой целью нами были проведен изотопный анализ доломитовых фаз разных генераций и исследованы флюидные включения, обнаруженные в крупно-грубозернистых кристаллах доломита и ангидрита из карбонатных пород-коллекторов в керне скв. 35-Хасырейская.

Изотопные отношения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ доломитов и доломитовых цементов

Было проведено изучение состава изотопов в разных доломитовых фазах кернов скважин 35-Хасырейская и 25-Черпаюская. Проанализировано 7 образцов доломитовых пород гребенского и овинпармского гори-

зонтов. В каждом образце опробовались: крупнокристаллический молочно-белый доломит выполнения пустот и трещин (1), среднезернистый светло-серый доломит рекристаллизации матрицы (2) и мелкозернистый серый доломит менее измененных участков матрицы (3) (табл. 1). Все образцы демонстрируют облегчение изотопного состава по обоим параметрам от более раннего мелкозернистого доломита (3) к более позднему крупнозернистому доломиту (1). Амплитуда облегчения в отдельных образцах составляет 0.6–1.4 ‰ для значений $\delta^{13}\text{C}$ и 2.5–3.8 ‰ для величины $\delta^{18}\text{O}$.

При этом более легкими по изотопам являются пробы из образца тектонической брекчии с признаками сдвиговой деформации. В менее нарушенных образцах наиболее легкими по изотопам являются доломитовые цементы поздней генерации. В целом пробы разных генераций демонстрируют облегчение изотопов по мере укрупнения размера кристаллов — от ранних фаз к фазам более поздним. Аналогичные результаты получены для доломитов овинпармского горизонта ручья Дэршор (Майдль, Нечаев, 2023). В них крупнозернистый доломит прожилков и цемен-

тов был обеднен ($\delta^{13}\text{C}$ от 0.0–1 до 5 ‰, а $\delta^{18}\text{O}$ от 1–3 до 6–7 ‰) по сравнению с доломитом диффузной доломитизации матрикса. Наибольшее облегчение фиксировалось для трещиноватых пород. При этом, совокупность проб крупнозернистых доломитовых цементов демонстрирует значимую ковариацию параметров $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$, в выборке проб матричного доломита линейная связь между параметрами отсутствует (Майдль, Нечаев, 2023).

Как известно, величина $\delta^{18}\text{O}$ широко используется в качестве индикаторов диагенеза и катагенеза карбонатных пород, хотя из-за влияния как температуры флюида, так и изотопного состава воды, трактовка значений этого параметра неоднозначна. Низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ могут быть следствием: а) пресноводного диагенеза и инфильтрационных вод, обедненных $\delta^{18}\text{O}$; б) растворов повышенных температур в зоне катагенеза (Swart P.K., 2015). Следовательно, карбонаты, сформированные при высоких температурах, могут иметь пониженные значения $\delta^{18}\text{O}$, сопоставимые с воздействием метеорного диагенеза, и их изотопный состав не дает однозначного ответа о природе флюидов.

Таблица 1. Параметры $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ доломитов разных генераций
Table 1. Parameters $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of dolomites of different generations

Образец / Sample	$\delta^{13}\text{C}$, ‰ VPDB			$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW		
	1	2	3	1	2	3
ХСР 4/2	–1.81	–1.86	–1.26	23.53	24.82	27.06
ХСР 6/5	–1.60	–1.44	–1.18	23.63	25.86	27.03
ХСР 10/2	–0.78	–0.51	0.55	22.97	26.79	26.12
ХСР 11/2	–2.39	0.16	–0.63	23.74	26.02	26.92
ХСР 15/2	–7.00	–5.82	–	23.27	26.86	–
ЧРП 18/2	–1.35	–0.65	0.04	26.89	26.46	27.47
ЧРП 18/5	–0.76	–0.17	–0.38	26.37	25.10	27.58

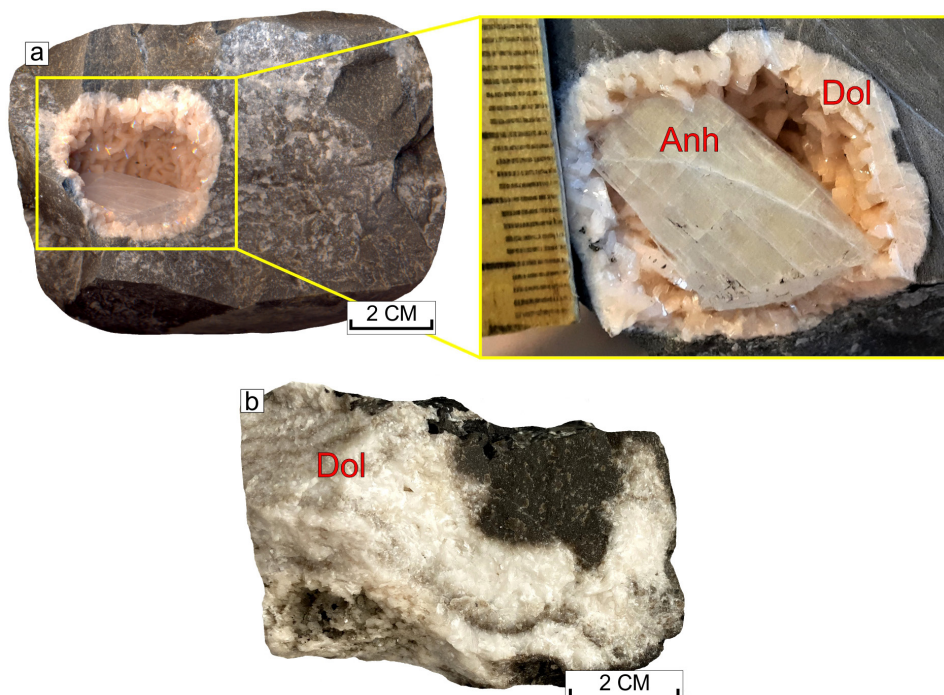


Рис. 4. Фото образцов на анализ флюидных включений из скв. 35-Хасырейская: а — обр. 3/3; б — обр. 13/3

Fig. 4. Photos of samples for the analysis of fluid inclusions from well 35-Khasyreyskaya: a — sample 3/3; b — sample 13/3



Результаты исследования флюидных включений

Для определения условий минералообразования нами изучены первичные включения в доломите и ангидрите, цементирующих каверну по выщелоченному органогенному обломку (рис. 4, а, обр. 3/3) и доломитовому цементу выполнения внутренних пустот замещенного остатка колонии табулят (рис. 4, б, обр. 13/3). К первичным отнесены те включения, которые встречаются поодиночке или небольшими группами.

Для доломита (обр. 3/3) характерны двухфазовые первичные включения с газовой фазой до 10 об. %. Они имеют разнообразную, иногда с элементами огранки форму, их размер не превышает 20 мкм (рис. 4, а). Температура эвтектики в жидкой фазе изменяется в пределах $-62...-64^{\circ}\text{C}$, что характерно для водных растворов хлорида кальция с примесями. Плавление происходит при $-19...-19.3^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о том, что соленость раствора равна 21–22.2 мас. % NaCl-экв. Гомогенизация включений происходит при $102-120^{\circ}\text{C}$ (табл. 2, рис. 5).

Доломит (обр. 13/3) полупрозрачный и отличается очень мелкими, не более 10 мкм, включениями неправильной формы. Двухфазовые первичные включения содержат газовую фазу до 10 об. %. Температура эвтектики жидкой фазы равна -68°C , на основании этого можно предположить присутствие солей хлорида кальция с примесями солей лития. Температура плавления, равная -21.5°C , свидетельствует о том, что концентрация солей близка 23.5 мас. % NaCl-экв.

Флюидные включения в ангидрите (обр. 3/3) отличаются крупным, часто более 100 мкм, размером и сильно вытянутой формой (рис. 5, б). Газовая фаза присутствует в них в небольшом количестве, менее 5 об. %. Температура эвтектики ($-48...-60^{\circ}\text{C}$) характерна для хлоридов кальция с примесями. Плавление последней льдинки происходит при температурах $-9...-18^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о том, что соленость раствора равна 13.5–21.0 мас. % NaCl-экв. Температура гомогенизации первичных флюидных включений равна $97-165^{\circ}\text{C}$. (табл. 2, рис. 6). При визуальном изучении отмечается большое количество вскрытых включений. Вскрытие,

Таблица 2. Результаты изучения флюидных включений в доломите и ангидрите в палеозойских карбонатных коллекторах Хасырейского месторождения

Table 2. Results of the study of fluid inclusions in dolomite and anhydrite in Paleozoic carbonate reservoirs of the Khasyrey field

№	ГФ об. % GP v. %	T _{эвт} /T _е	T _{пл} /T _м	Соленость, мас. % NaCl-экв Salinity, wt. % NaCl-eq	T _{гом} /T _{hom}	Примечания Notes
		°C				
Доломит (обр.3/3) / Dolomite (sample 3/3)						
1	5	-61	-18	21	103	первичное / primary -//- -//- -//- -//- -//-
2	5	-62	-19.2	22.1	115	
3	5-10	-63	-19.0	22	102	
4	5-10	-64	-19.2	22.1	113	
5	5	-62	-19	22	120	
6	5	-63	-19.3	22.2	113	
Доломит (обр.13/3) / Dolomite (sample 13/3)						
7	10	-68	-21.5	23.5	110	первичное / primary -//- -//-
8	5-10	-//-	-//-	23.5	116	
9	5	-	-	-	110	
Ангидрит (обр.3/3) / Anhydrite (sample 3/3)						
10	До 5	-52	-15	19	150	первичное / primary -//- -//- -//-
11	-//-	-52	-9	13.5	97	
12	-//-	-48	-14	18	136	
13	-//-	-60	-18	21	165	

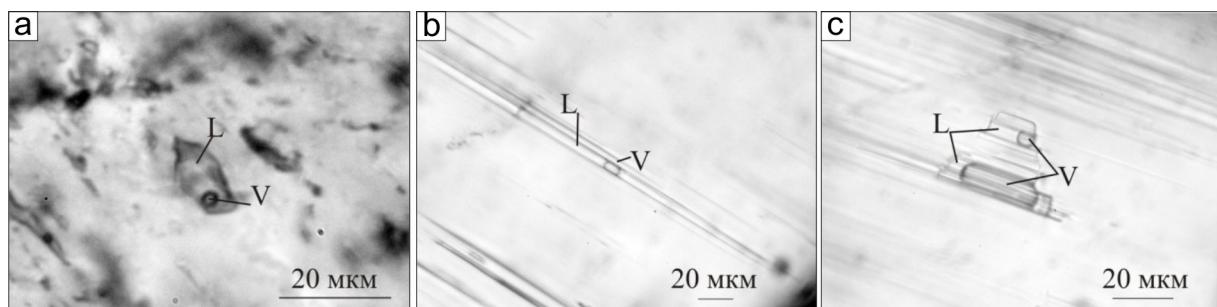


Рис. 5. Включения: а — первичные в доломите (обр.3/3); б — первичные в ангидрите 3/3; в — гетерогенного захвата в ангидрите (обр.3/3). V — газовая фаза, L — жидкая фаза

Fig. 5. Inclusions: а — primary in dolomite (sample 3/3); б — primary in anhydrite (sample 3/3); в — of heterogeneous capture in anhydrite (sample 3/3). V — gas phase, L — liquid phase

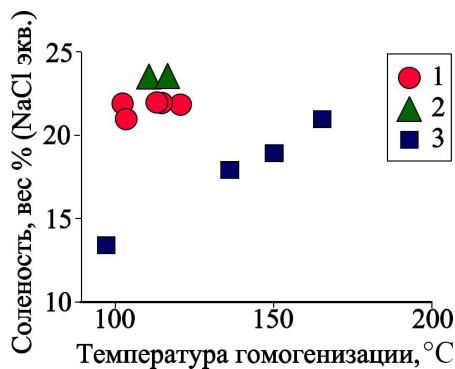


Рис. 6. Соотношение температуры гомогенизации и солености жидкой фазы в флюидных включениях: 1 — в доломите 3/3; 2 — в доломите 13/3; 3 — в ангидрите 3/3

Fig. 6. The ratio of the homogenization temperature and salinity of the liquid phase in fluid inclusions: 1 — in dolomite 3/3; 2 — in dolomite 13/3; 3 — in anhydrite 3/3

вероятно, произошло во время изготовления пластинок. Кроме того, довольно часто наблюдаются включения с разным соотношением газовой и жидкой фазы (рис. 5, с). Для термометрии такие включения непригодны, так как образовались, скорее всего, в результате гетерогенного захвата, либо при контакте пластинок ангидрита с водой и спиртом на стадии изготовления.

Для определения газового состава флюидных включений проведено рамановское исследование. В доломитах наблюдается очень большой фон (рис. 7, а). Виден пик воды, редко — метана. Пики других газов отсутствуют или перекрыты фоном. Возможно, некоторые газы присутствуют в количествах ниже предела определения. В ангидритах фон заметно ниже, но, как и в доломитах, диагностируется вода, реже с метаном (рис. 7, б).

Обсуждение результатов

По морфологическим и геохимическим особенностям крупнозернистый ромбоэдрический или «седловидный» доломит выполнения пустот не отличается

ся от аналогичных доломитов, описанных во многих разрезах катагенетически измененных карбонатных пород, включающих залежи углеводородов, воды древних водоносных горизонтов и рудные сульфидные месторождения типа долины Миссисипи — (MVT). Характерными признаками для них являются: послойное обогащение Fe, Mn и Ca, изменение изотопных отношений $\delta^{13}\text{C}$ в диапазоне от слегка положительных до умеренно отрицательных значений и умеренно отрицательные значения $\delta^{18}\text{O}$ (Warren, 2019).

В исследованных доломитах флюидные включения гомогенизируются при температуре от 102 до 120 °C. Соленость жидкой фазы флюидных включений равна 21.0–23.5 мас. % NaCl-экв., что значительно превышает соленость морской воды. В ангидрите, который является более поздним по времени образования, интервал температур гомогенизации включений несколько шире и составляет 97–165 °C. Соленость жидкой фазы изменяется в пределах от 13.5 до 21.0 мас. % NaCl-экв. Температуры эвтектики жидкой фазы включений в доломите и ангидрите предполагают наличие хлоридов кальция, но более низкая температура во включениях доломита может быть следствием примеси солей лития.

Полученные данные свидетельствуют, что кристаллизация цементов происходила из рассолов относительно умеренных температур с признаками прямой метаморфизации (накопления кальция) морских талассогенных вод. Как известно, метаморфизация сопровождается увеличением с глубиной общей минерализации подземных рассолов и увеличением концентраций ряда микроэлементов, достигающих максимальных величин в глубоких метаморфизованных рассолах хлоркальциевого типа (Краснов и др. 2004). В свете современных представлений о формировании седиментационных рассолов считается, что образование в них избыточных концентраций редких щелочных элементов происходит в результате взаимодействия с вмещающими породами первичных хлормagneиевых рассолов, вследствие чего происходит метаморфизация их в хлоркальциевые рассолы (Крайнов и др., 2004), а вмещающие известняки постепенно замещаются доломитами. Максимальные же concentra-

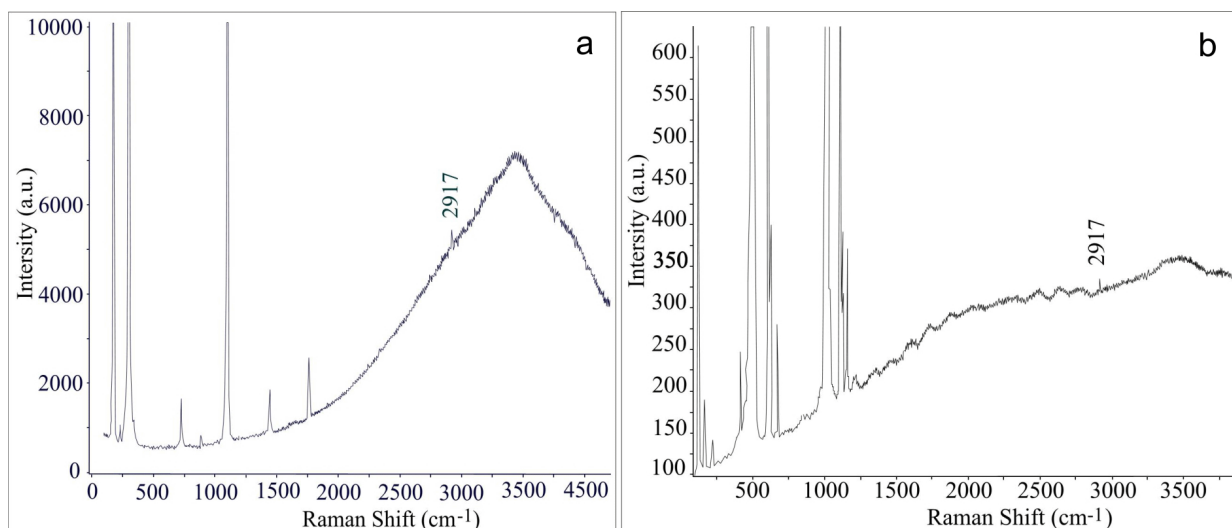


Рис. 7. Рамановские спектры газовой фазы: а — в доломите; б — в ангидрите

Fig. 7. Raman spectra of the gas phase: a — in dolomite; b — in anhydrite



ции редких щелочных элементов приурочены к наиболее метаморфизованным рассолам, обладающим максимальными содержаниями кальция.

В рассольных водах литий накапливается в значительных количествах. Наиболее обогащены им внутрисолевые и надсолевые рассолы галогенных формаций (Крайнов и др., 2004).

Учитывая, что состав вод комплекса вала Гамбурцева и сопредельных территорий гряды Чернышева хлоридно-натриевый с высоким содержанием кальция, рассолы, законсервированные во включениях, являются более метаморфизованными, чем воды вмещающих пород. Присутствие в породах галита свидетельствует о напорном (илизионном) режиме поступления рассолов из нижних горизонтов осадочного чехла и их генетической связи с рассолами соленосных толщ ордовика. Метановый состав газовой фазы включений может быть связан с процессами генерации и термальной деградации углеводородов.

Интересным является тот факт, что температура гомогенизации включений в более позднем ангидриде выше, чем в доломите (рис. 3, 5). Вероятно, это связано с активизацией гидротермального процесса на более поздней стадии.

Важным является также то, что крупнозернистый доломит выполняет каверны и пустоты трещин, то есть его кристаллизацию предваряет процесс избирательного растворения — выщелачивания. Это накладывает требование — циркулирующие рассолы изначально должны быть агрессивны к карбонатным породам, насыщаясь минералами по мере циркуляции.

Растворение эвапоритов в присутствии углеводородов и продуктов термального восстановления сульфатов считается одним из наиболее вероятных источников рассолов, образующих седловидный доломит. Эти рассолы (как и рассолы магматического происхождения) отличаются повышенной кислотностью и могут быть химически очень агрессивны для известняков (Warren, 2019; Machel, 2001). При достаточно большом объеме растворения пород может формироваться гидротермальный карст (Gao et al., 2020).

Заключение

В изученных нами верхнесилурийско-нижнедевонских разрезах скважин вала Гамбурцева морфологические и минералогические особенности вторичных преобразований пород-коллекторов дают основание полагать значительное участие в этом процессе термальных агрессивных растворов, поступавших по трещинным зонам из подстилающих отложений. Формирование зон трещинной проницаемости и «раскрытие» глубинных водно-углеводородных систем, вероятно, было приурочено к основным для провинции рубежам тектогенеза Р/Т — Т/Ј. Флюиды, принимавшие участие в образовании жильной минерализации продуктивных коллекторов вала Гамбурцева, характеризуются невысокой температурой 97–165 °С и повышенной соленостью. В них преобладают соли кальция, что соответствует характеристикам геотермальных рассолов, более измененным, чем воды вмещающих пород, включающим, вероятно, продукты растворения соленосных толщ ордовика и продуктов термальной сульфатредукции. Присутствие в породах галита сви-

детельствует о напорном (илизионном) режиме поступления рассолов из нижних горизонтов осадочного чехла и их генетической связи с рассолами соленосных толщ ордовика.

Работа проводилась в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 122040600010-8; FUUU-2022-0057).

Литература / References

- Белонин М. Д., Буданов Г. Ф., Данилевский С. А., Прищепина О. М., Теплов Е. Л. Тимано-Печорская провинция: геологическое строение, нефтегазоносность и перспективы освоения. СПб: Недра, 2004. 396 с.
- Belonin M. D., Budanov G. F., Danilevsky S. A., Prishchepa O. M., Teplov E. L. Timan-Pechora province: geological structure, oil and gas content and development prospects. St. Petersburg: Nedra, 2004, 396 p. (in Russian)
- Борисенко А. С. Изучение солевого состава растворов газозо-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Borisenko A. S. Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals using cryometry. Geology and Geophysics, 1977, No. 8, pp. 16–27. (in Russian)
- Душин А. С., Мельников А. В., Федоров А. И., Рыкус М. В. Новая флюидодинамическая модель карбонатного коллектора месторождения им. Р. Требса на основе синтеза геологических и промысловых данных // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 2. С. 13–23.
- Dushin A. S., Melnikov A. V., Fedorov A. I., Rykus M. V. New fluid dynamic model of the carbonate reservoir of the R. Trebs field based on the synthesis of geological and field data. Oil and Gas Business, 2016, V. 14, No. 2, pp. 13–23. (in Russian)
- Жемчугова В. А., Маслова Е. Е. Вторичная доломитизация как фактор, определяющий коллекторские свойства нижнедевонских отложений восточного борта Хорейверской впадины (Тимано-Печорский нефтегазоносный бассейн) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2020. № 3. С. 47–56.
- Zhemchugova V. A., Maslova E. E. Secondary dolomitization as a factor determining the reservoir properties of Lower Devonian deposits on the eastern side of the Khoreyver depression (Timan-Pechora oil and gas basin). Bulletin of Moscow University. Series 4: Geology, 2020, No. 3, pp. 47–56. (in Russian)
- Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швеиц В. М. Геохимия подземных вод: Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
- Krainov S. R., Ryzhenko B. N., Shvets V. M. Geochemistry of groundwater: Theoretical, applied and environmental aspects. Moscow: Nauka, 2004, 677 p. (in Russian)
- Майдль Т. В. Литология и коллекторы продуктивных карбонатных отложений нижнего девона вала Гамбурцева // Геология и ресурсы горючих ископаемых европейского Севера СССР (Труды Ин-та геологии Коми научного центра УрО РАН). Сыктывкар, 1989. С. 34–46.
- Maydl T. V. Lithology and reservoirs of productive carbonate deposits of the Lower Devonian of the Gamburtsev swell. Geology and resources of fossil fuels of the European North of the USSR (Proceedings of the Institute of Geology Komi SC UB RAS). Syktyvkar, 1989, pp. 34–46. (in Russian)

- Майдль Т. В., Нечаев М. С. Палеокарст, термальный карст нижнедевонских карбонатных резервуаров Тимано-Печорской провинции: характер проявления и диагностика // *Материалы Всероссийской научной конференции (с иностранным участием). Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов (Литол 2023)*. М.: ГЕОС, 2023. С. 104–107.
- Maydl T. V., Nechaev M. S. Paleokarst, thermal karst of the Lower Devonian carbonate reservoirs of the Timan-Pechora province: nature of manifestation and diagnostics. *Proc. of the All-Russian Scientific Conference (with foreign participation). Fundamental problems in the study of volcanic-sedimentary, terrigenous and carbonate complexes (Litol 2023)*. Moscow: GEOS, 2023, pp. 104–107. (in Russian)
- Малышев Н. А. Тектоника, эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов европейского севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 271 с.
- Malyshev N. A. Tectonics, evolution and oil and gas content of sedimentary basins of the European north of Russia. *Yekaterinburg: UB RAS*, 2002, 271 p. (in Russian)
- Сотникова А. Г. Варандей-Адзвинский авлакоген: зоны нефтегазонакопления в карбонатных среднеордовик-нижнедевонских отложениях и приоритетные направления геологоразведочных работ на углеводородное сырьё (суша, Печороморский шельф) // *Геология нефти и газа*. 2009. № 2. С. 10–21.
- Sotnikova A. G. Varandey-Adzva aulacogen: zones of oil and gas accumulation in carbonate Middle Ordovician-Lower Devonian deposits and priority directions of geological exploration for hydrocarbon raw materials (onshore, Pechora Sea shelf). *Geology of Oil and Gas*, 2009, No. 2, pp. 10–21. (in Russian)
- Ульняров И. Л., Майдль Т. В. Литология, условия осадконакопления и формирование пород-коллекторов верхнесилурийских карбонатных отложений вала Гамбурцева (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция) // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2023. Т. 18. № 3. http://www.ngtp.ru/rub/2023/26_2023.html
- Ulnyrov I. L., Maydl T. V. Lithology, sedimentation conditions and formation of reservoir rocks of the Upper Silurian carbonate deposits of the Gamburtsev swell (Timan-Pechora oil and gas province). *Oil and Gas Geology. Theory and practice*, 2023, V. 18, No. 3. http://www.ngtp.ru/rub/2023/26_2023.html (in Russian)
- Benjakul R., Hollis C., Robertson H. A., Sonnenthal E. L., Whitaker F. F. Understanding controls on hydrothermal dolomitization: insights from 3D reactive transport modelling of geothermal convection // *Solid Earth*. 2020. Vol. 11. No. 6. P. 2439–2461. DOI: 10.5194/se-11-2439-2020
- Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignano: Siena. 1994. P. 117–130.
- Davies G. R., Smith L. B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview // *Bulletin American Association Petroleum Geologists*. 2006. V. 90. P. 1641–1690.
- Du Y., Fan T., Machel H. G., Gao Z. Genesis of Upper Cambrian-Lower Ordovician dolomites in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China: Several limitations from petrology, geochemistry, and fluid inclusions // *Marine and Petroleum Geology*. 2018. V. 91. P. 43–70. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2017.12.023
- Gao B., Tian F., Pan R. F., Zheng W. H., Li R., Huang T. J., Liu Y. S. Hydrothermal dolomite paleokarst reservoir development in wolonghe gasfield, Sichuan Basin, revealed by seismic characterization. // *Water*. 2020. V. 12. №. 2. 579 p. DOI: 10.3390/w12020579
- Hardie L. A. Dolomitization: A critical view on some current views // *Journal of Sedimentary Petrology*. 1987. Vol. 57. P. 166–183.
- Land L. S. The origin of massive dolomite // *Journal of geological education*. 1985. Vol. 33. P. 112–125.
- Machel H. G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights // *Sedimentary Geology*. 2001. V. 140. P. 143–175. DOI: 10.1016/S0037-0738(00)00176-7
- Machel H. G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal. *Geological Society Special Publications*, 2004, vol. 235, pp. 7–63.
- Swart P. K. The geochemistry of carbonate diagenesis: The past, present and future // *Sedimentology*. 2015. Vol. 62. P. 1233–1304. DOI: 10.1111/sed.12205
- Warren J. Saline dolomites: Ancient — part 4 of 4 — saddle dolomite, calcite and anhydrite spar burial salts. *Salty matters*. 2019. P. 1–22. URL: <http://www.saltworkconsultants.com/blog-salty-matters>
- Whitaker F. F., Smart P. L., Jones G. D. Dolomitization: from conceptual to numerical models // *Special Publication of the Geological Society*. 2004. Vol. 235. P. 99–139. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.235.01.05
- Whitaker F. F., Xiao Y. Reactive transport modeling of early burial dolomitization of carbonate platforms by geothermal convection // *AAPG Bulletin*. 2010. Vol. 94. P. 889–917.

Поступила в редакцию / Received 05.06.2024



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552.12 + 552.16

DOI: 10.19110/geov.2024.7.2

Характер матрикса — индикатор температурных условий формирования зювитов (на примере обломочных импактитов Карского метеоритного кратера)

Н. И. Максименко, Т. Г. Шумилова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
nadiamaximenko@mail.ru

В работе предлагается новый подход к изучению особенностей формирования зювитов — определение температурных условий становления обломочных импактитов на основе анализа локального характера спекания компонентов матрикса с применением методов материаловедения. Изучены структурно-текстурные особенности и вещественный состав матрикса зювитов донной и аэродинамической фации Карской астроблемы. Петрохимический состав матрикса обломочных импактитов отражает состав пород мишени, может быть осложнен наложенными процессами в связи с постимпактным преобразованием зювитов. Класты кварца и альбита в матриксе имеют признаки разных стадий спекания, указывающие на сильное различие локальных температурных обстановок, что объясняется термически гетерогенным характером становления зювитов. В связи с этим, определение конкретной температуры становления породы в целом не может быть корректным. При литификации зювитов аэродинамической фации температура локально достигала ~1200 °С. Зювиты донной фации являются относительно более высокотемпературными, максимальная температура при их становлении локально составляла около 1700 °С. Характер спекания матрикса зювитов является индикатором условий формирования и может быть использован для диагностики фаций обломочных импактитов и выяснения параметров и сценария ударных событий.

Ключевые слова: зювиты, матрикс, импактитогенез, импактные фации, Карская астроблема

Matrix nature is an indicator of temperature conditions of suevite formation (on the example of clastic impactites of the Kara meteorite crater)

N. I. Maksimenko, T. G. Shumilova

Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The paper proposes a new approach for the study of suevites formation features — the analysis of temperature conditions of clastic impactites formation based on the analysis of local matrix sintering using materials science methods. Structural and textural features and substance composition of the suevite matrix of the bottom and ejecta facies of the Kara astrobleme are studied. The petrochemical composition of the clastic impactite matrix reflects the composition of the target rocks, it can be complicated with the suevites post-impact altering. Quartz and albite clusters in the matrix have signs of different sintering stages, indicating a strong variety in local temperature conditions of the suevites formation. In this regard, it makes no sense to conclude about a certain temperature of rock formation as a whole. During lithification the suevites of aerodynamic facies the local temperature could reach 1200 °C. The bottom facies had relatively higher temperature formation where the maximum temperatures locally reached 1700 °C. The sintering nature of the suevite matrix is an indicator of the specifics of the formation conditions and can be used to diagnose facies of detrital impactites and to clarify the parameters and scenario of impact events.

Keywords: suevite, matrix, impactite genesis, impactite facies, Kara astrobleme

Введение

Ударные кратеры образуются при высокоскоростных столкновениях космических тел и являются широко распространенными геологическими структурами. При ударе давления и температуры достигают огромных (шоковых) значений, поэтому при исследо-

вании космогенных структур и импактных пород важен анализ параметров ударного события. Оценки РТ-условий ударного метаморфизма принято проводить по специальным признакам: макроскопическим (ударные конусы, структуры «грис»), петрографическим (деформационные трещины, планарные деформацион-

Для цитирования: Максименко Н. И., Шумилова Т. Г. Характер матрикса — индикатор температурных условий формирования зювитов (на примере обломочных импактитов Карского метеоритного кратера) // Вестник геонаук. 2024. 7(355). С. 13–23. DOI: 10.19110/geov.2024.7.2

For citation: Maksimenko N. I., Shumilova T. G. Matrix nature is an indicator of temperature conditions of suevite formation (on the example of clastic impactites of the Kara meteorite crater). Vestnik of Geosciences, 2024, 7(355), pp. 13–23, doi: 10.19110/geov.2024.7.2

ные элементы) и минералогическим (высокобарные минеральные фазы — алмаз, коэсит и другие минералы) (French, 1998; Stöffler, Grieve, 2007). Данные признаки успешно применяются в мировой практике изучения импактитов для выяснения параметров образования импактных структур и специфики образования импактных пород.

Зювиты представляют собой полимиктовые импактные брекчии. Основными составными компонентами зювитов являются витрокласты (включения застывшего импактного расплава), литокласты (обломки пород мишени) и матрикс (тонкодисперсная масса). При исследованиях зювитов признаки ударного метаморфизма могут быть применены для характеристики воздействия лишь для отдельных составных компонентов, но не пород в целом. Вместе с тем, обломочные импактиты в некоторых случаях представляют основной объем коптогенного комплекса и являются важным источником информации о параметрах ударного события. Это определяет важность изучения зювитов и необходимость выявления признаков для анализа условий образования этого специфического типа пород.

Для определения таких признаков может быть использован матрикс зювитов. Матрикс представляет собой тонкодисперсный (менее 0.01 см) цементирующий материал зювитов (Геологический словарь, 2011; Селивановская и др., 1990). Ранее исследователями отмечалось, что условия формирования полимиктовых брекчий лучше всего отражаются именно в матриксе (Фельдман, 1990). Вопросы изучения матрикса обломочных импактитов затрагивались в работах Г. Р. Осински (Osinski et al., 2004), К. Майер (Mayer, 2012), Д. Штоффлера (Stöffler et al., 2013). Однако, исследования матрикса зювитов, как правило, проводились в рамках изучения обломочных импактитов в целом и не имеют детальной характеристики. Поэтому на сегодняшний день матрикс зювитов остается наименее изученным компонентом обломочных импактитов.

Известно, что зювиты могут образовываться в различных фациальных обстановках, отличаются механизмами и условиями формирования — импактными фациями. Импактная фация — это «ассоциация импактных пород, возникших при преобразовании материала пород места удара, экскавации импактного кратера, выбросе, отложении и литификации этого материала и характеризующихся особенностями формы залегания, состава вещества, а также структурно-текстурными особенностями» (Геологический словарь, 2010). Зювиты формируются в условиях аэродинамической и донной фаций. Зювиты аэродинамической фации образуются при отложении и литификации материала взрывного облака, зювиты донной фаии — из центробежных потоков обломочного материала в придонной части кратера. Известно, что зювиты аэродинамической фаии образуются в относительно холодных условиях, в то время как донные отложения — в более горячих (Фельдман, 1990). В литературе упоминается, что донные импактные брекчии могут иметь спекшийся («сваренный») характер компонентов, вплоть до образования спекшихся пород (агглютинатов) (Вишневский, 1994; Фельдман, 1990; Электронный справочник, 2024). Однако, до сих пор не было представлено четкого описания спекшихся зювитов и признаков спекания обломочных импактитов. Учитывая

специфику образования обломочных импактитов, такие признаки могут быть выявлены в матриксе обломочных импактитов.

С 2015 года нами проводится систематическое изучение импактитов Карской астроблемы (Шумилова и др., 2016; Shumilova et al., 2020). Среди обломочных импактитов Карского кратера были охарактеризованы отложения донной и аэродинамической фаций (Максименко, Шумилова, 2022). Данная работа посвящена исследованию матрикса зювитов донной и выбросной фаии Карской астроблемы с целью определения признаков для выяснения условий становления зювитов, как породы.

Материалы и методы исследования

Объектом настоящего исследования является матрикс зювитов Карской астроблемы. Обломочные импактиты были отобраны в восточной, южной и западной бортовой частях кратера, в долинах рек Б. Вануйта, Анарога, Кара, Сопчаю и Саяха. Зювиты донной фаии изучены в бассейнах рек Анарога и Кара, зювиты аэродинамической фаии — в бассейнах рек Б. Вануйта, Кара, Сопчаю и Саяха.

Из штучных образцов зювитов были изготовлены большие двусторонне полированные шлифы. С использованием оптического микроскопа Nikon ECLIPSE E400 POL в шлифах были проанализированы петрографические особенности матрикса в проходящем и отраженном свете, производился подбор представительных областей матрицы с целью дальнейшего изучения под электронным микроскопом. Ввиду тонкодисперсного характера матрикса, основные исследования проводились методом сканирующей электронной микроскопии. Изучение проводилось с использованием электронного микроскопа Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Oxford Instruments X-Max в шлифах с углеродным напылением. Исследованы структурно-текстурные и вещественные особенности матрикса зювитов. Состав минеральных кластов матрикса анализировался локально с помощью энергодисперсионной спектроскопии (EDS). Петрохимический состав матрицы изучен с помощью площадного EDS-анализа в разных пространственно удаленных представительных участках матрикса зювитов. В зависимости от представительности выбранных участков анализа проводились по площади от 50 до 300 мкм². Для анализа полученных петрохимических данных были использованы вариационные диаграммы петрогенных компонентов. Для уточнения петрохимического состава производилось поэлементное энергодисперсионное картирование.

Результаты

Минералогические и структурно-текстурные особенности матрикса

При оптических наблюдениях матрикса зювитов в шлифах выявляется его неоднородное строение, брекчиевидная структура и неравномерное распределение по площади. Цвет матрицы варьируется от серого, темно-серого, желтовато-коричневого до бурого и оранжево-коричневого. Неоднородность окраски определяет пятнистый характер основной массы зювита.



Матрикс зювитов *аэродинамической фации* представляет собой преимущественно пористую, частично спекшуюся глинисто-слюдистую массу, содержащую относительно более крупные минеральные класты (рис. 1). В нем встречаются поры открытого и закрытого типа, которые могут быть крупными и протяженными (более 70 мкм), что придает матриксу рыхлую текстуру. Содержание пор в матриксе колеблется от 5 до 15 об. %. Участками матрикс имеет более плотное строение. В таких участках минеральные класты погружены в сплошную низкопористую тонкодисперсную массу, как бы обволакивающую отдельные кристаллокласты (рис. 2, f).

Минеральный состав матрикса представлен кварцем, кальцитом и альбитом, в меньшей степени отмечаются ортоклаз, мусковит, хлорит, серицит, частицы углеродистого вещества, пирит, единично — гранат, эпидот, анатаз, магнетит, титанит, титаномagnetит и рутил. Наиболее широко развиты кварц и кальцит, которые хорошо выявляются по характеру распределения химических элементов (рис. 1, c). Размер кристаллокластов варьируется от 5 до 40 мкм, иногда более 40 мкм. Форма кристаллокластов угловатая или слабо округлая, неправильная. Очертания отдельных минеральных частиц, как правило, четкие, хорошо ограниченные от вмещающей тонкодисперсной ткани и соседних минеральных

частиц (рис. 2). В редких случаях кристаллокласты имеют неотчетливые очертания и неровные границы, иногда они имеют признаки «припекания» — наблюдаются маломощные перешейки на контактах частиц (рис. 2, c, d, f). Реже отдельные кристаллокласты образуют спекшиеся минеральные агрегаты с открытой и закрытой пористостью, с хорошо различимыми очертаниями спекшихся частиц (рис. 2, e, g, h).

Матрикс зювитов *донной фации* характеризуется брекчиевидной структурой, имеет плотное строение и относительно низкое содержание пор (около 5 об. %) (рис. 3). Редкие поры не крупные (до ~10 мкм), неправильной или изометричной округлой формы, часто изолированного типа. Минеральный состав, в целом, аналогичен матриксу зювитов *аэродинамической фации*. Главными минералами здесь являются кварц и полевые шпаты (альбит, реже ортоклаз). Отмечается интенсивное развитие глинистых минералов (сметита) в межзерновом пространстве и в виде обособлений в матриксе (рис. 3, a, b), что хорошо видно по характеру распределения магния на картах распределения химических элементов (рис. 3, c). Минеральные класты имеют угловатые или округлые очертания (рис. 4). Более крупные обломки кварца могут иметь крупные деформационные трещины или неотчетливые планарные деформационные элементы.

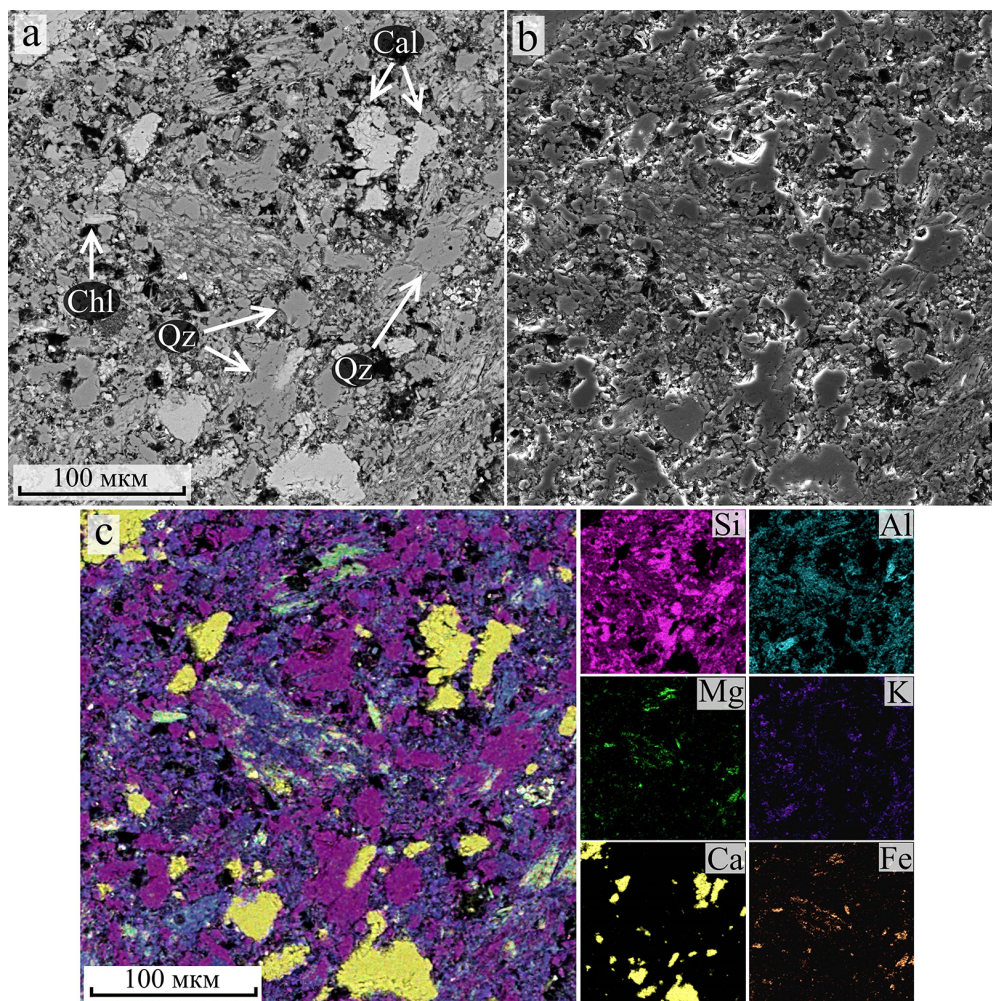


Рис. 1. Структурно-текстурные особенности (СЭМ-изображения: а — BSE, б — SE) и карты распределения химических элементов (с) в матриксе зювитов *аэродинамической фации* (р. Кара). Cal — кальцит, Chl — хлорит, Qz — кварц

Fig. 1. Structural and textural features (electron microscopic images: a — BSE, b — SE) and maps of chemical element distribution (c) in suevite matrix of the ejecta facies (Kara River). Cal — calcite, Chl — chlorite, Qz — quartz

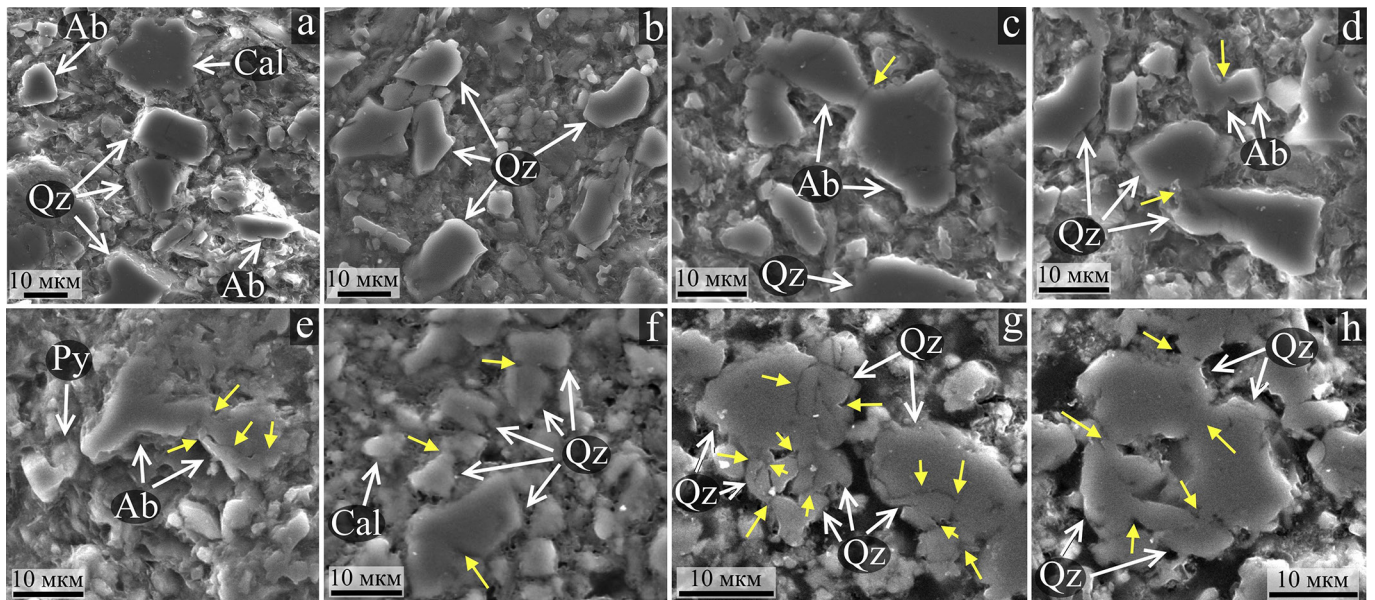


Рис. 2. Кристаллокласты в матрице зювитов аэродинамической фации (СЭМ-изображения, SE). Ab — альбит, Cal — кальцит, Py — пирит, Qz — кварц. а–d — зювиты района р. Саяхи; е — зювиты района р. Б. Вануйта; f — зювиты района р. Кары; g, h — зювиты района р. Сопчаю. Желтыми стрелками показано спекание кристаллокластов

Fig. 2. Crystalloclasts in matrix of the ejecta facies of suevites (electron microscopic images, SE). Ab — albite, Cal — calcite, Py — pyrite, Qz — quartz. a–d — suevites of the Sayakha River area; e — suevites of the B. Vanuyta River area; f — suevites of the Kara River area; g, h — suevites of the Sopchayu River area. Yellow arrows point to sintering of the crystalloclasts

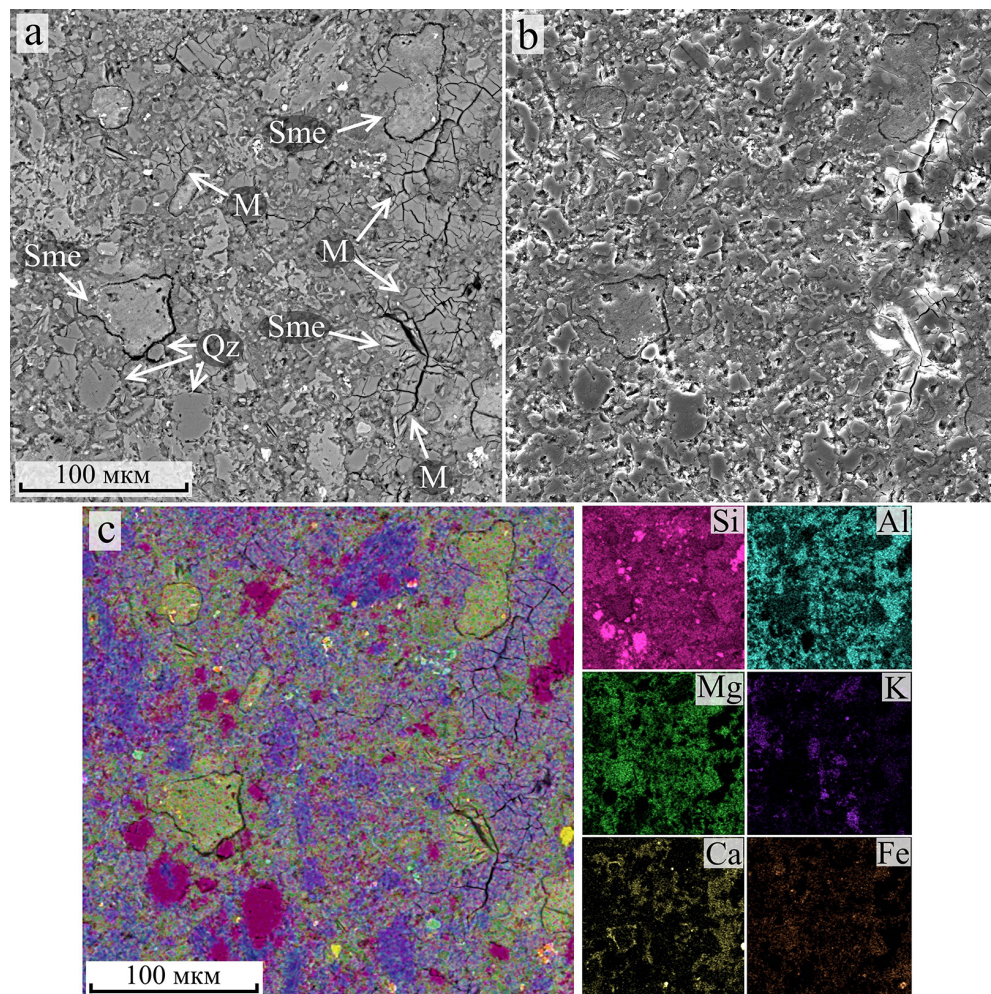


Рис. 3. Структурно-текстурные особенности (СЭМ-изображения: а — BSE, b — SE) и карты распределения химических элементов (с) в матрице зювитов донной фации (р. Анарога). М — застывший импактный расплав, Sme — смектит, Qz — кварц

Fig. 3. Structural and textural features (electron microscopic images: a — BSE, b — SE) and maps of chemical element distribution (c) in suevite matrix of the bottom facies (Anaroga River). M — solidified impact melt, Sme — smectite, Qz — quartz



В матрице донных зювитов отмечаются включения застывшего импактного расплава, имеющие алюмосиликатный состав (рис. 3, с). Они характеризуются неправильной, удлинённой, кляксообразной (аутоморфной) формой и неровными, иногда пламеневидными очертаниями, что придает матриксу аутоморфную текстуру (рис. 3, а, b).

Характерной особенностью матрикса зювитов донной фации является присутствие спекшихся минеральных агрегатов (спеков) (рис. 4, d–g), которые представлены обособленными минеральными микротельцами размером до 60 и более мкм, характеризующимися неправильной формой с неровными границами. Спекки обладают низкой, часто закрытой пористостью и плохо различимыми очертаниями отдельных кристаллокластов (рис. 4, e–g). В пределах спеков частицы в некоторых случаях имеют форму многогранников с ровными границами (рис. 4, g), поры могут иметь неправильную, округлую или «полигранную» форму с ровными стенками (рис. 4, d–g). Изредка в матриксе отмечаются класты кварца частично угловатой, а частично неправильной формы со сглаженными или ровными очертаниями (рис. 4, h).

Петрохимический состав матрикса

Матрикс изученных зювитов характеризуется достаточно широким разбросом по содержанию петрогенных компонентов (рис. 5). Матрица зювитов аэродинамической и донной фации имеет широкие вариации состава по концентрации кремнезема (52–91 вес. %), глинозема (2–14 вес. %) и по оксидам щелочей (Na_2O и K_2O ~0–4 вес. %). В то же время, фации зювитов хорошо разделяются по FeO и MgO. Более высокие содержания этих компонентов характерны для зювитов донной фации (FeO 2–19 вес. % и MgO 4–15 вес. %). Зювиты аэродинамической фации, напротив, отличаются относительно низким содержанием FeO и MgO (1–5 вес. % каждый). Обращает на себя внимание, что

зювиты аэродинамической фации, в целом, характеризуются относительно более высоким содержанием CaO (до 24 вес. %), в отличие от зювитов донной фации, где содержание оксида кальция составляет 1–7 вес. %. Выявлены некоторые различия вещественного состава матрикса по содержанию Al_2O_3 и K_2O , которые наблюдаются у зювитов из разных областей астроблемы (рис. 5).

Относительно высокое содержание оксидов железа и магния в матриксе зювитов донной фации может быть связано с обилием глинистой компоненты в матрице этих пород, что подтверждается данными микроскопических исследований (рис. 3). Бурное развитие глинистых минералов может указывать на интенсивное вторичное преобразование зювитов, при котором отмечается обилие слоистых силикатов (Naumov, 2002; Stöffler et al., 2013). Этот процесс может свидетельствовать, что материал обломочных импактитов после отложения оставался горячим довольно долго (Вишневский, 1992). Относительно высокое содержание CaO в зювитах аэродинамической фации может быть обусловлено широким развитием кальцита в поровом пространстве матрикса, что также наблюдается при гидротермальных преобразованиях обломочных импактитов (Naumov, 2002; Stöffler et al., 2013) и хорошо согласуется с выявленными особенностями матрицы (рис. 1). Наблюдаемые различия матрикса зювитов из разных участков астроблемы по содержанию Al_2O_3 и K_2O , учитывая петрологические различия обломочных импактитов (Максименко и др., 2020; Шумилова и др., 2019) и минералого-петрохимическую специфику пород мишени астроблемы (Ковальчук, Шумилова, 2020), скорее всего, связаны с различием состава исходного протолита зювитов.

Таким образом, выявленные петрохимические особенности матрикса зювитов донной и аэродинамической фаций могут быть обусловлены составом пород мишени астроблемы и постимпактными изменениями

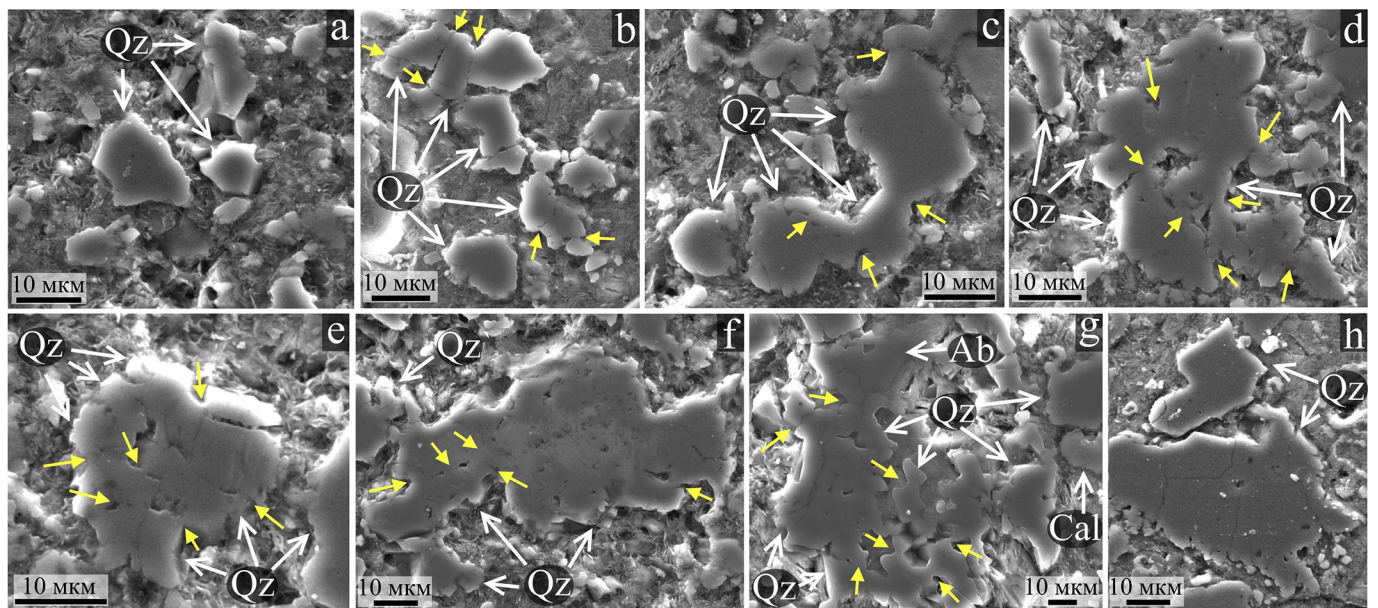


Рис. 4. Кристаллокласты кварца (Qz) и альбита (Ab) в матриксе зювитов донной фации (СЭМ-изображения, SE). а, с–g — зювиты района р. Кары; b, h — зювиты района р. Анароги. Желтыми стрелками показаны участки спекания кристаллокластов

Fig. 4. Crystalclasts of quartz (Qz) and albite (Ab) in the matrix of suevites of the bottom facies (electron microscopic images, SE). а, с–g — suevites of the Kara River; b, h — suevites of the Anaroga River. Yellow arrows point to sintering of the crystalloclasts

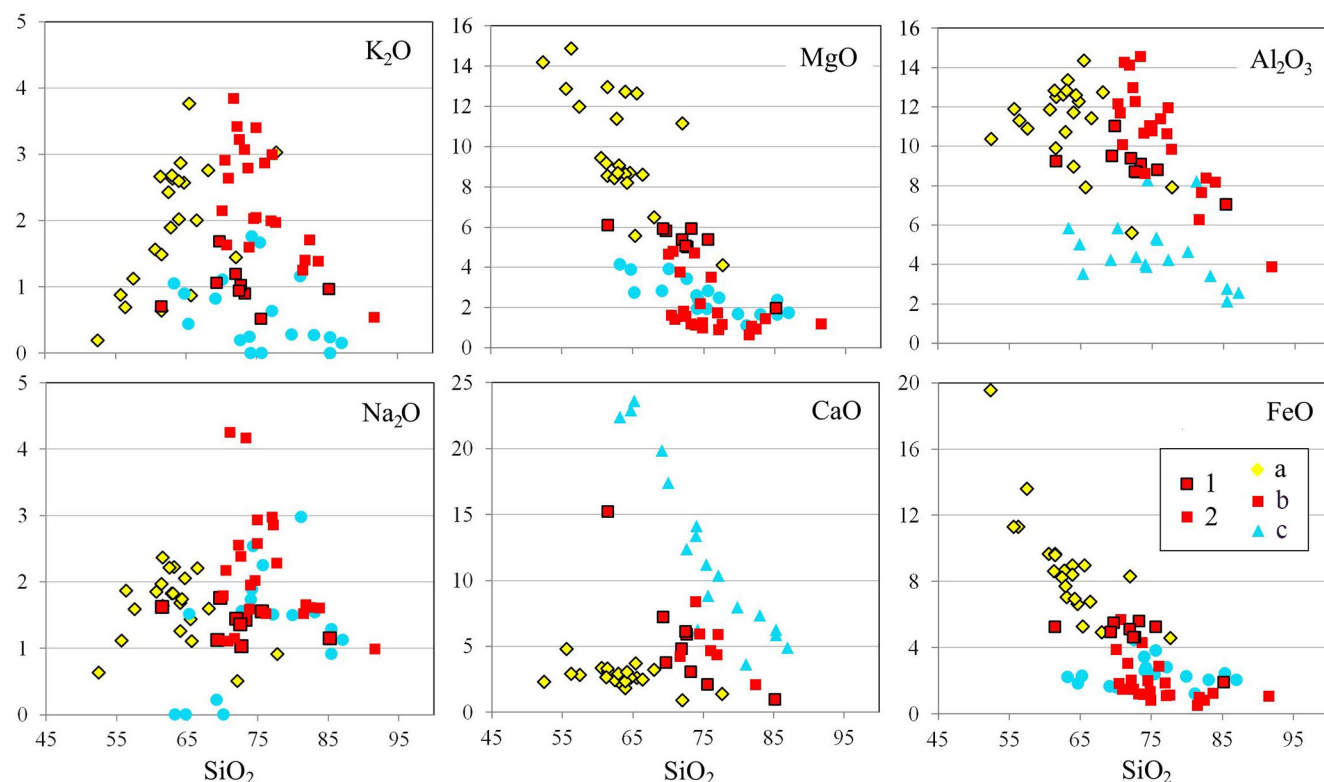


Рис. 5. Вариационные диаграммы петрогенных компонентов матрикса зювитов Карской астроблемы по данным площадного микрозондового анализа с нормированием на 100 (вес. %). Фации зювитов: 1 — донная, 2 — аэродинамическая. Районы распространения зювитов: а — р. Анарога, b — р. Кара, с — р. Сопчаю

Fig. 5. Variation diagrams of petrogenic components of suevite matrix of the Kara astrobleme based on the data of area microprobe analysis, normalized to 100 wt %. Suevite facies: 1 — bottom, 2 — ejecta. Suevite distribution areas: a — Anaroga River, b — Kara River, c — Sopchayu River

обломочных импактитов, т. е. отражают протогенетические особенности протолита и эпигенетические изменения, и не могут быть использованы для анализа условий становления обломочных импактитов.

Обсуждение

Главным источником информации о температурных обстановках формирования импактных пород являются их порообразующие минералы (Фельдман, 1990). Матрикс зювитов характеризуется разнообразием минерального состава и хорошо подходит для анализа температурных условий становления зювитов. Для этого используются минералы-индикаторы температуры. К температурным маркерам относятся кварц, полевые шпаты, циркон, ильменит и магнетит (Stöffler et al., 2013). Другие минералы, такие как хлорит, эпидот, слюды, смектит, кальцит, с учетом интенсивного гидротермального преобразования зювитов (Naumov, 2002), скорее всего, являются новообразованными и не могут быть использованы в качестве надежных реперов для анализа температурного режима формирования обломочных импактитов.

Как правило, для оценки условий образования зювитов используются трековый анализ минералов, анализы остаточной намагниченности и реакционных кайм обломков известняков (Stöffler et al., 2013). Нами установлено, что структурно-текстурные особенности матрицы обломочных импактитов проявляют аналогичность со структурой керамических материалов (Шелер и др., 2015; German, 2014; Kong et al., 2015; Richerson,

Lee, 2018 и др.), при образовании которых вещество проходит разные стадии спекания. Мы предлагаем новый подход к изучению особенностей генезиса зювитов — определение специфики температурных условий их становления по характеру локального спекания матрикса, основываясь на подходах материаловедения.

Спекание — это агломерация «индивидуального вещества, взятого в виде порошка при высокой температуре, но ниже его температуры плавления, а также смеси веществ, при температуре ниже температуры плавления хотя бы одного из них» (Салахов, 2015; Сайфуллин, Сайфуллин, 2010). Спекание принято разделять на три стадии — начальную, промежуточную и заключительную (Richerson, Lee, 2018) (рис. 6). Известно, что температура спекания монокомпонентной системы составляет 0.6–0.8 от температуры плавления материала (Chmielewski et al., 2014). За температуру начальной стадии спекания монокомпонентной системы можно принять значение нижней границы температуры спекания, а за температуру заключительной стадии — значение верхней границы (0.6 и 0.8 от температуры солидуса соответственно). Следовательно, температура промежуточной стадии спекания может приниматься равной 0.7 от температуры плавления.

Наиболее распространенными минералами — температурными индикаторами в матриксе изученных зювитов являются кварц и альбит, присутствующие во всех изученных зювитах. Поэтому эти минералы могут быть использованы для оценки локальных температур формирования зювитов.



Спекание				Плавление
Начальная стадия		Промежуточная стадия	Заключительная стадия	
Структурно-текстурные особенности				 Исчезновение границ между частицами, формирование округлых пор и сглаженных очертаний
	Исходные частицы	Рост контактных перешейков и усадка	Рост частиц, образование замкнутых пор, выпрямление границ между частицами	
	Перегруппировка частиц	Увеличение площади контакта между частицами	Рост частиц, уменьшение числа и объема пор, частицы принимают форму многогранников, поры - "полигранную форму"	
	Припекание частиц - образование контактных перешейков с сохранением структурной индивидуальности отдельных частиц	Увеличение контактов, рост частиц, начало формирования закрытой пористости, образование единого пористого тела	Рост частиц, исчезновение пористости, частицы принимают форму тетраэдра	
Условные обозначения: частицы границы между частицами пористость				Условные обозначения: расплав поры

Рис. 6. Схема стадий спекания и плавления (по Андриянов, Лукин, 1979; Уляшев и др., 2023; Шелег и др., 2015; German, 2014; Kong et al., 2015; Richerson, Lee, 2018)

Fig. 6. Schemes of sintering stages and melting (after Andriyanov, Lukin, 1979; Ulyashev et al., 2023; Sheleg et al., 2015; German, 2014; Kong et al., 2015; Richerson, Lee, 2018)

В зювитах аэродинамической фации альбит установлен в виде угловатых, хорошо обособленных кластов без признаков спекания (рис. 2, а). Отсутствие признаков спекания альбитовых кластов указывает на то, что температура локально не достигала нижней границы спекания альбита — около 660 °C (0.6 от температуры плавления альбита) (Navrotsky et al., 1982; Chmielewski et al., 2014). При этом альбитовые класты на контакте друг с другом могут припекаться, что выражается в появлении маломощных контактных перешейков на границах зерен, что по (Richerson, Lee, 2018) является признаком начальной стадии спекания (рис. 2, с). Реже альбитовые класты образуют спекшиеся минеральные агрегаты с сохраненными очертаниями частиц (рис. 2, е), что является признаком промежуточной стадии спекания (Richerson, Lee, 2018). Эти признаки указывают на локальные температуры, достигающие ~660 °C и ~770 °C (0.6 и 0.7 от температуры плавления альбита соответственно) (Navrotsky et al., 1982; Chmielewski et al., 2014).

Кварцевые класты в матриксе зювитов аэродинамической фации могут присутствовать как в обособленном виде (рис. 2, б) (температура локально не достигала начала спекания кварца ~1030 °C) (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014), так и с признаками припекания. Класты кварца могут иметь признаки припекания, когда их границы характеризуются маломощными

ми контактными перешейками (рис. 2, d, f), что является характерной особенностью начальной стадии спекания (Richerson, Lee, 2018). Это указывает на то, что температура при литификации зювитов локально могла достигать порядка 1030 °C (0.6 от температуры плавления кварца) (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014). Кроме того, в матриксе зювитов аэродинамической фации установлены спекшиеся кварцевые агрегаты с порами открытого и изолированного типа, с неровными границами между спекшимися частицами в пределах спеков (рис. 2, g, h). Эти особенности отражают промежуточную стадию спекания, на которой начинается формирование закрытой пористости, а частицы еще сохраняют неровные очертания (рис. 6) (Richerson, Lee, 2018). Соответственно, локальная температура матрикса при литификации зювитов локально могла достигать около 1200 °C (0.7 от температуры плавления кварца) (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014).

Матрикс обломочных импактитов донной фации отличается более высокой степенью локального спекания. Кварц может присутствовать в виде угловатых микрокластов без признаков спекания (рис. 4, а), что указывает на локальную температуру ниже 1030 °C (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014). Также изредка отмечаются припекшиеся класты кварца (рис. 4, б), означающие локальную температуру около 1030 °C (0.6

от температуры плавления кварца) (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014). Однако более распространен кварц в виде спекшихся минеральных частиц, образующих плотные обособленные микротельца с низкой, преимущественно закрытой пористостью (рис. 4, d–g). Поры в спеках имеют неправильную, округлую или «полигранную» форму, границы между спекшимися

частицами ровные. Эти признаки отвечают заключительной стадии спекания, на которой происходит уменьшение объема пор, выравнивание границ между зернами, а также формирование «полигранной» формы пор (рис. 6) (Richerson, Lee, 2018). Соответственно, локальная температура могла достигать 0.8 от температуры плавления кварца (температуры заключитель-

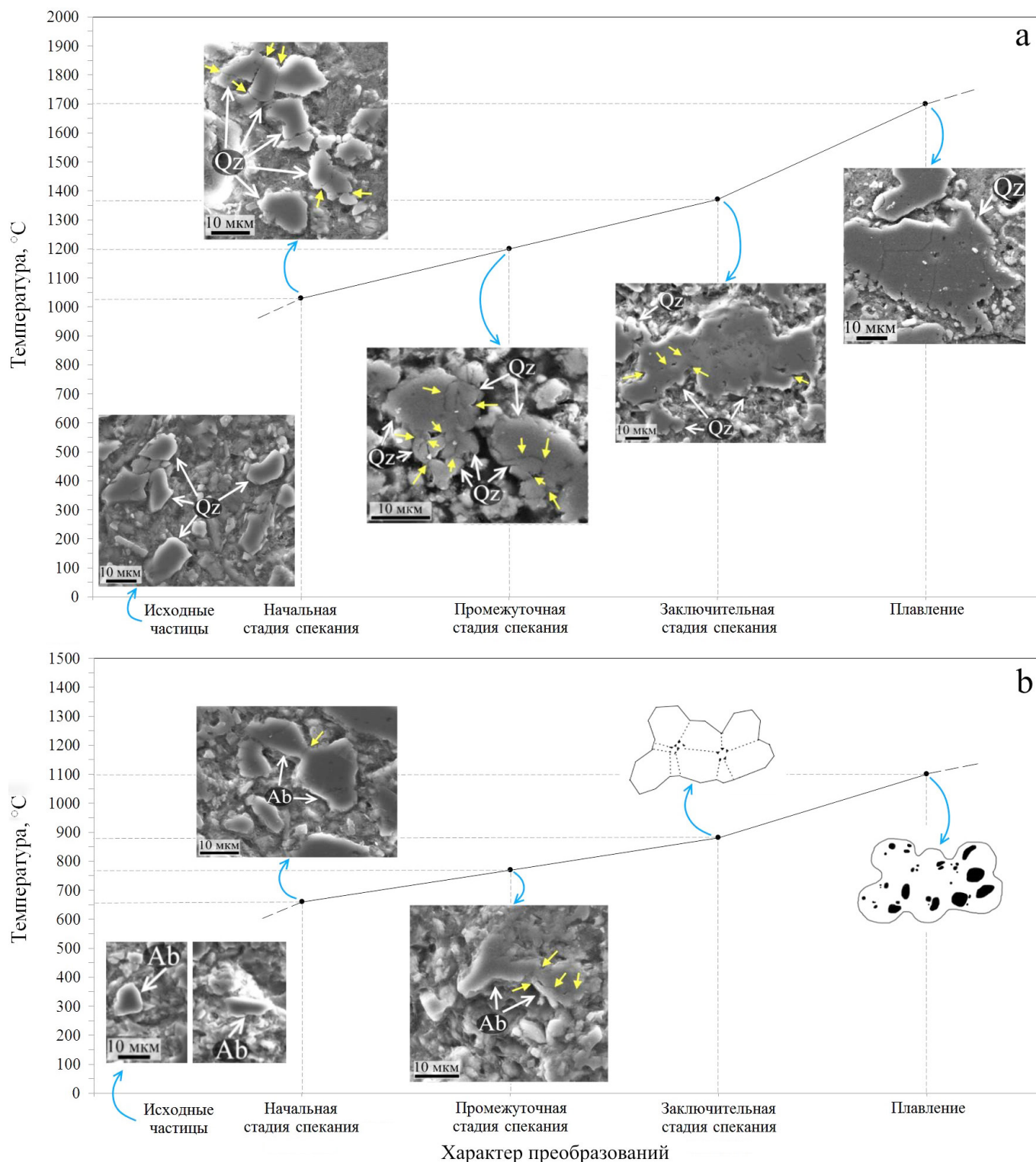


Рис. 7. Схема характера преобразования кварца (а) и альбита (б) в матрице зювитов Карской астроблемы в зависимости от температуры. Температуры рассчитаны с использованием данных (Navrotsky et al., 1982; He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014; Richerson, Lee, 2018). СЭМ-изображения, SE. Желтыми стрелками показано спекание кристаллокластов

Fig. 7. Scheme of quartz (a) and albite (b) transformation in suevite matrix of the Kara astrobleme as a function of temperature. Temperatures were calculated using data from (Navrotsky et al., 1982; He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014; Richerson, Lee, 2018). Electron microscopic images, SE. Yellow arrows point to sintering of crystalloclasts



ной стадии спекания кварца) — около 1370 °C (He et al., 2021; Chmielewski et al., 2014). Интересной особенностью донных зювитов является присутствие в матриксе кластов кварца угловатой формы с частично сглаженными очертаниями и мелкими округлыми порами (рис. 4, h). Эти особенности находят отражение в морфологии расплавных ударных стекол, полученных экспериментальным путем (Уляшев и др., 2023) (рис. 6). Сохраненные угловатые очертания указывают на частичное плавление кластов в зювитах *in situ*, уже после попадания в породу. Соответственно, температура локально могла достигать температуры плавления кварца (около 1700 °C) (He et al., 2021), но кратковременно, поскольку не произошло полного плавления таких кластов.

Таким образом, установлено, что матрикс зювитов Карской астроблемы характеризуется разным характером спекания минеральных компонентов. Для кварца выявлены признаки трех основных стадий спекания. Альбит в матриксе зювитов присутствует от неизмененных частиц до промежуточной стадии спекания. С использованием полученных данных построены диаграммы, отображающие характер изменений кварца и альбита в зависимости от температуры (рис. 7). На диаграммах точками обозначены температуры начала различных стадий преобразования кварца (рис. 7, а) и альбита (рис. 7, b), кривые показывают возрастание температуры и смену стадий преобразования этих минералов. Диаграммы проиллюстрированы соответствующими характерными структурно-текстурными особенностями кристаллокластов в матриксе зювитов Карской астроблемы. Отмечается, что наиболее интен-

сивные структурно-текстурные преобразования кварца и альбита происходят начиная с промежуточной стадии спекания (около 1200 °C для кварца и около 770 °C для альбита), на которой кристаллокласты образуют спекшиеся минеральные агрегаты и утрачивают свою обособленность. При дальнейшем увеличении температуры такие спекы преобразуются в единые минеральные микротельца, в которых очертания отдельных спекшихся частиц становятся неразличимы.

С использованием выявленных признаков спекания альбита и кварца в матриксе установлены максимальные локальные температурные условия при становлении фаций зювитов Карской астроблемы. Наиболее чувствителен к температуре альбит, поэтому характер его спекания может служить маркером нижней границы диапазона температур становления обломочных импактитов. Кварц, как более термоустойчивый минерал, может использоваться в качестве индикатора верхней границы возможных максимальных локальных температур при формировании зювитов. Исходя из полученных данных, следует, что становление зювитов аэродинамической фации происходило при локальных температурах от <600 до 1200 °C, зювитов донной фации — при температурах от <1030 до 1700 °C (рис. 8). Таким образом, формирование зювитов Карского кратера происходило в условиях очень широкого диапазона температур даже в пределах одной фации, что подтверждает гетерогенный характер условий формирования обломочных импактитов на микроуровне. В целом, для зювитов фации донных центробежных потоков характерна более высокая максимальная локальная температура при становлении по-

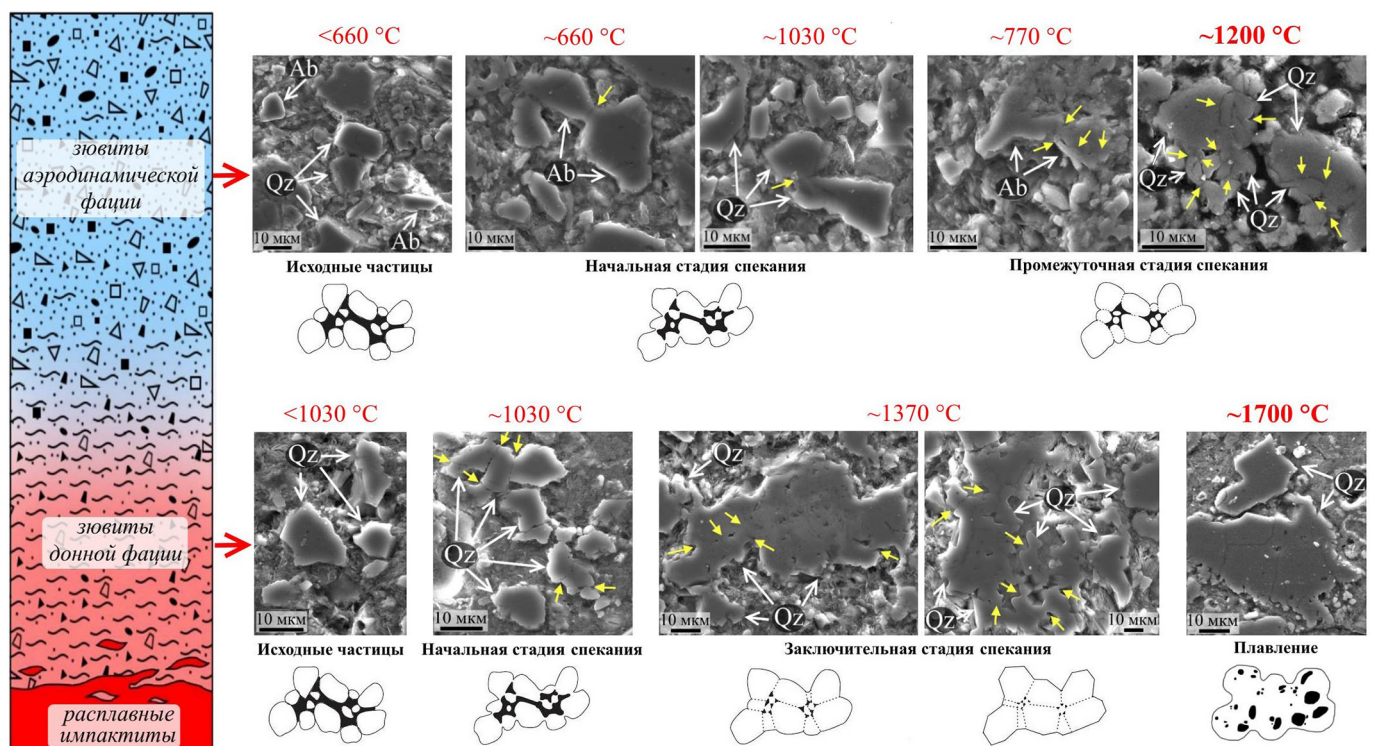


Рис. 8. Характер спекания матрикса и локальные температуры становления фаций зювитов на схеме разреза коптогенного комплекса Карской астроблемы (вне масштаба). СЭМ-изображения, SE. Желтыми стрелками показано спекание кристаллокластов

Fig. 8. Nature of matrix sintering and local temperatures of suevite facies formation on the diagram of the section of the copto-genic complex of the Kara astrobleme (out of scale). electron microscopic images, SE. Yellow arrows point to sintering of crystalloclasts



роды (~1700 °С) по сравнению с обломочными импактитами аэродинамической фации (~1200 °С), что хорошо согласуется с известными моделями импактного кратерообразования (Stöffler et al., 2013).

Сильно гетерогенный температурный режим становления обломочных импактитов определяется количеством и размерами капель ударного расплава, присутствующих в кластическом материале при литификации (Максименко и др., 2020, 2022). Кроме того, важным фактором для температурного режима может быть плотность осадка — в донной фации более плотный кластический материал, обеспечивающий первично придонной потоковой природой и перекрытием толщей аэродинамического материала. При этом, учитывая очень большую разницу локальных термических условий, оценивать конкретную температуру формирования зювитов некорректно. В то же время, анализ максимальных температур представляется весьма полезным при выполнении фациального анализа обломочных импактитов.

Заключение

В результате проведенных исследований впервые детально описаны структурно-текстурные и вещественные особенности матрикса фаций обломочных импактитов Карской астроблемы. Установлено, что матрикс зювитов донной и аэродинамической фаций характеризуется разнообразием минерального состава и широкими вариациями петрохимического состава. Определено, что петрохимический состав матрикса зювитов может быть обусловлен особенностями состава исходного протолита и постимпактного преобразования обломочных импактитов и не является определяющим признаком для выявления фациальных условий образования зювитов. Фациальные различия зювитов отражаются различными структурно-текстурными особенностями матрикса, на основе которых, с использованием подходов материаловедения, проведен анализ характера спекания матрикса. Выявлено, что он различен. Кварц и альбит в матриксе также отличаются по стадиям спекания, соответствующим разным температурным условиям. Установлено, что зювиты донной фации отличаются более высокой локальной максимальной температурой литификации — около 1700 °С, зювиты аэродинамической фации — около 1200 °С. Таким образом, характер спекания матрикса зювитов является хорошим индикатором условий формирования и может быть использован в качестве инструмента для установления максимальных температурных условий при литификации и для диагностики фаций обломочных импактитов в других астроблемах, что важно при выяснении параметров и сценариев ударных событий. В ходе проведенных исследований установлен весьма гетерогенный характер термических условий формирования обломочных импактитов, что указывает на отсутствие возможности определения конкретных условий становления зювитов как породы в целом.

Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории минералогии алмаза ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за помощь в экспедиционных работах и отборе образцов зювитов, Е. М. Тропникову за помощь в электронно-микроскопическом исследовании зювитов, А. Е. Шмы-

рову за помощь в пробоподготовке. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Геонаука» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Работа выполнена в рамках темы НИР ГР № 122040600009-2.

Литература / References

- Андрианов Н. Т., Лукин Е. С. Термическое старение керамики. Москва: Металлургия, 1979. 100 с.
- Andrianov N. T., Lukin E. S. Thermal aging of ceramics. Moscow: Metallurgy, 1979, 100 p. (in Russian)
- Вишневский С. А. Зювитовые мегабрекчии — новый тип отложений взрывного облака Попигайской астроблемы. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГТМ, 1994. 66 с.
- Vishnevsky S. A. Zuvite megabreccias — a new type of explosive cloud deposits in the Popigai astrobleme. Novosibirsk: SB RAS SRC UIGGM, 1994, 66 p. (in Russian)
- Геологический словарь. В трех томах. Т. 1. А-Й. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2010. 432 с.
- Geological dictionary. In three volumes. V. 1. A-Й. St. Petersburg: VSEGEI, 2010, 432 p. (in Russian)
- Геологический словарь. В трех томах. Т. 2. К-П. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2011. 480 с.
- Geological dictionary. In three volumes. V. 2. K-П. St. Petersburg: VSEGEI, 2011, 480 p. (in Russian)
- Ковальчук Н. С., Шумилова Т. Г. Минералого-геохимические особенности черных сланцев окружения Карской астроблемы (Пай-Хой) // Литосфера. 2020. 20 (2). С. 168–183. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-168-183
- Kovalchuk N. S., Shumilova T. G. Mineralogical and geochemical features of black shales surrounding the Kara astrobleme (Pai-Khoi). Lithosphere, 2020, 20 (2), pp. 168–183. (in Russian)
- Максименко Н. И., Шумилова Т. Г., Ковальчук Н. С. Петрологическая характеристика разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) // Петрология. 2020. Т. 28. № 6. С. 628–649. DOI: 10.31857/S0869590320050039.
- Maksimenko N. I., Shumilova T. G., Kovalchuk N. S. Petrological characteristics of suevite varieties of the Kara astrobleme (Pai-Khoi, Russia). Petrology, 2020, V. 28, No. 6, pp. 628–649. (in Russian)
- Максименко Н. И., Шумилова Т. Г. Критерии фациального деления зювитов (на примере зювитов Карской астроблемы) // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. №10 (124). DOI: 10.23670/IRJ.2022.124.69
- Maksimenko N. I., Shumilova T. G. Criteria for the facies division of suevites (using suevites of the Kara astrobleme as an example). International Research Journal, 2022, No. 10 (124). (in Russian)
- Сайфуллин Р. С., Сайфуллин А. Р. Современная химико-физическая энциклопедия — лексикон. Казань: Издательство «Фэн» АН РТ, 2010. 696 с.
- Saifullin R. S., Saifullin A. R. Modern chemical-physical encyclopedia — lexicon. Kazan: Fan, 2010, 696 p. (in Russian)
- Салахов А. М. Структурообразование керамики из глин, формирующих при обжиге различные минеральные фазы // Керамические строительные материалы. 2015. № 8. С. 68–74.
- Salakhov A. M. Structure formation of ceramics from clays that form various mineral phases during firing. Ceramic building materials, 2015, No. 8, pp. 68–74. (in Russian)



- Селивановская Т. В., Мащак М. С., Масайтис В. Л. Импактные брекчии и импактиты Карской и Усть-Карской астроблем // Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя. Л.: Наука. 1990. С. 55–96.
- Selivanovskaya T. V., Maschak M. S., Masaitis V. L. Impact breccias and impactites of the Kara and Ust-Kara astroblemes. Impact craters at the Mesozoic-Cenozoic boundary. Leningrad: Nauka, 1990, pp. 55–96. (in Russian)
- Уляшев В. В., Шумилова Т. Г., Исаенко С. И. Характеристика стекол в продуктах экспериментального моделирования импактных расплавов // Стекло и керамика. 2023. Т. 96. № 5. С. 14–22. DOI: 10.14489/glc.2023.05.pp.014-022
- Ulyashev V. V., Shumilova T. G., Isaenko S. I. Characteristics of glasses in the products of experimental modeling of impact melts. Glass and Ceramics, 2023, V. 96, No. 5, pp. 14–22. (in Russian)
- Фельдман В. И. Петрология импактитов. Москва: МГУ, 1990. 299 с.
- Feldman V. I. Petrology of impactites. Moscow: Moscow State University, 1990, 299 p. (in Russian)
- Шелег В. К., Ковчур А. С., Москалец Р. А. Теоретический анализ диффузии при спекании порошковых материалов // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2015. Вып. 29. С. 114–120.
- Sheleg V. K., Kovchur A. S., Moskalets R. A. Theoretical analysis of diffusion during sintering of powder materials. Bulletin of the Vitebsk State Technological University. 2015, 29, pp. 114–120. (in Russian)
- Шумилова Т. Г., Исаенко С. И., Ковальчук Н. С., Уляшев В. В., Makeev B. A. Разновидности импактитов, апоугольных алмазов и сопутствующих углеродных фаз Карской астроблемы // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2016): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2016. С. 270–271.
- Shumilova T. G., Isaenko S. I., Kovalchuk N. S., Ulyashev V. V., Makeev B. A. Varieties of impactites, apogonol diamonds and associated carbon phases of the Kara astrobleme. Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin readings 2016): Proceedings of the mineralogical seminar with international participation. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2016, pp. 270–271. (in Russian)
- Шумилова Т. Г., Ковальчук Н. С., Makeev B. A. Геохимическая специфика алмазоносных зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой) // Доклады академии наук. 2019. 486 (2). С. 233–236. DOI: 10.31857/S0869-56524862233-236
- Shumilova T. G., Kovalchuk N. S., Makeev B. A. Geochemical specificity of diamondiferous suevites of the Kara astrobleme (Pai-Khoi). Doklady Earth Sciences, 2019, 486 (2), pp. 233–236. (in Russian)
- Электронный справочник-определитель импактитов и брекчиевых образований астроблем России на примере Попигаийской, Карской и Усть-Карской астроблем. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ. 2024. URL: <http://esprav.vsegei.ru/?ruid=cbae64d392441749538cdc73124ccef#2c102a469d1894646> (дата обращения: 28.05.2024)
- Electronic reference book-determinant of impactites and breccia formations of astroblemes of Russia on the example of Popigai, Kara and Ust-Kara astroblemes. Saint Petersburg: VSEGEI. 2024. URL: <http://esprav.vsegei.ru/?ruid=cbae64d392441749538cdc73124ccef#2c102a469d1894646> (date of access: 28.05.2024) (in Russian)
- French B. M. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. 120 p.
- Chmielewski M., Nosewicz Sz., Rojek J., Pietrzak K., Mackiewicz S., Romelczyk-Baishya B. A study of densification and microstructure evolution during hot pressing of NiAl/Al₂O₃ composite // Advanced Composite Materials. 2014. 24. P. 1–10. DOI: 10.1080/09243046.2013.879408
- He J., Jusnes K. F., Tangstad M. Phase transformation in quartz at elevated temperatures // Aspects in Mining & Mineral Science. 2021. 6. P. 691–699. DOI: 10.31031/AMMS.2021.06.000629
- German R. M. Sintering: from empirical observations to scientific principles. Elsevier, 2014. 536 p.
- Kong L. B., Huang Y. Z., Que W. X., Zhang T., Li S., Zhang J., Dong Zh., Tang D. Transparent Ceramics. Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer, 2015. XII. 734 p.
- Meyer C. Sedimentological, structural and geochemical investigations of the suevite of the impact crater Nördlinger Ries, Germany. PhD thesis. Berlin: Free University, 2012. 130 p.
- Navrotsky A., Capobianco C., Stebbins J. Some thermodynamic and experimental constraints on the melting of albite at atmospheric and high pressure // Journal of geology. 1982. V. 90. № 6. P. 679–698. DOI: 10.1086/628724
- Naumov N. V. Impact-Generated Hydrothermal Systems: Data from Popigai, Kara, and Puchezh-Katunki Impact Structures // Impacts in Precambrian Shields. Ed. J. Plado, L. J. Pesonen. Impact Studies. Berlin, Heidelberg: Springer. 2002. P. 117–171. DOI: 10.1007/978-3-662-05010-1_6
- Osinski G. R., Grieve R. A. F., Spray J. G. The nature of the ground-mass of surficial suevite from the Ries impact structure, Germany, and constraints on its origin // Meteoritics & Planetary Science. 2004. Vol. 39. Issue 10. P. 1655–1683. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00065.x
- Richerson D. W., Lee W. E. Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design, 4th Ed. CRC Press, 2018. 837 p. DOI: 10.1201/9780429488245
- Shumilova T. G., Zubov A. A., Isaenko S. I., Karateev I. A., Vasiliev A. L. Mysterious long-living ultrahigh pressure or secondary impact crisis // Scientific Reports. 2020. Vol. 10 (2591). DOI: 10.1038/s41598-020-59520-3
- Stöffler D., Grieve R. Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms // Recommendation of the International Union of Geological Sciences. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2007. P. 82–92.
- Stöffler D., Artemieva N. A., Wünnemann K., Reimold U. W., Jacob J., Hansen K. B., Summerson I. A. T. Ries crater and suevite revisited — Observations and modeling Part I: Observations // Meteoritics & Planetary Science. 2013. V. 48. № 4. P. 515–589. DOI: 10.1111/MAPS.12086

Поступила в редакцию / Received 13.06.2024



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК: 552.321.6: 552.16 (234.851)

DOI: 10.19110/geov.2024.7.3

Серпентиниты зоны меланжа на севере массива Рай-Из, вмещающие ювелирный гранат (андрадит-демантоид)

В. П. Лютоев¹, А. Б. Макеев², Ю. С. Симакова¹, Е. Н. Терехов³

¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, vlutoev@mail.ru

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, abmakeev@mail.ru

³Геологический институт РАН, Москва, terekhoff.zhenya@yandex.ru

Изучен химический состав, проведены спектроскопический (Фурье ИК, ЭПР) и рентгенодифракционный анализы серпентинитов из вмещающих пород проявлений ювелирного граната андрадита-демантоида из зоны меланжа северной части массива Рай-Из. Методом синхронного термического анализа определен количественный видовой состав пород серпентинитов. Установлено, что серпентиниты представлены тремя разновидностями: лизардитом-1Т и хризотилом-2М_{Cl} в пробе РТМ-1 и хризотилом-Ог_{Cl} в пробе РТМ-2. Комплекс проведенных исследований позволил установить минеральный состав изученных образцов серпентинитов и зеленосланцевую (хризотилую) фацию прогрессивного контактового метаморфизма.

Ключевые слова: серпентиниты, лизардит, хризотил, гранат андрадит-демантоид, зона меланжа массива Рай-Из

Serpentinities of the melange zone in the north of the Ray-Iz massif, hosting gem garnet (andradite-demantoid)

V. P. Lyutoev¹, A. B. Makeyev², Yu. S. Simakova¹, E. N. Terekhov³

¹Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow

³Geological Institute RAS, Moscow

The chemical composition was studied; spectroscopic (FTIR, EPR) and X-ray diffraction analyses of serpentinites from the host rocks of gem garnet andradite-demantoid occurrences of their melange zone in the northern part of the Ray-Iz massif were carried out. The quantitative species composition of the serpentinites was determined by the method of synchronous thermal analysis. We found that serpentinites were represented by three varieties of lizardite-1T and chrysotile-2M_{Cl} in sample PTM-1 and chrysotile-Or_{Cl} in sample PTM-2. The complex of conducted studies allowed specifying the mineral composition of the studied serpentinite samples and greenschist (chrysotile) facies of progressive contact metamorphism.

Keywords: serpentinites, lizardite, chrysotile, andradite-demantoid garnet, melange zone of the Ray-Iz massif

Введение

В Уральской петрологической мегапровинции известно два пояса ультрабазитовых массивов. Один — протяженный пояс хромитоносных альпинотипных ультрабазитовых массивов общей площадью более 10 тыс. км² (Макеев, Брянчанинова, 1999), второй, располагающийся западнее первого, — платиноносный пояс дунит-клинопироксенитовых массивов с меньшей площадью распространения. Для них характерно несколько этапов регрессивного и прогрессивного метаморфизма. Определение возраста и Р-Т условий протекания этапов метаморфизма ультрабазитов является весьма актуальной задачей. В пределах Среднего и Полярного Урала известно несколько проявлений ювелирного граната демантоида зеленого, желтого и ко-

ричневого цветов, приуроченных к зонам меланжа и к внешним тектоническим контактам ультрабазитовых массивов (Иванов, 1998; Карасева, Кисин, Мурзин, 2021; Макеев, Терехов, 2024). Размер изометричных зерен, их обломков и ромбододекаэдрических кристаллов демантоида варьируется от 1 до 12 мм. В пределах Среднего Урала и др. в платиноносных дунит-клинопироксенитовых массивах (Каркодинском, Уфалейском) демантоид добывают несколько артелей на протяжении уже более 150 лет, облагораживают, нагревая до температуры более 1000 °С, при этом гранат становится ярко-изумрудно-зеленым. Далее зерна и кристаллы граната кабошонируют и вставляют в украшения. Стоимость уральского демантоида сравнима с изумрудом. Последние несколько лет подобные проявления

Для цитирования: Лютоев В. П., Макеев А. Б., Симакова Ю. С., Терехов Е. Н. Серпентиниты зоны меланжа на севере массива Рай-Из, вмещающие ювелирный гранат (андрадит-демантоид) // Вестник геонаук. 2024. 7(355). С. 24–31. DOI: 10.19110/geov.2024.7.3

For citation: Lyutoev V. P., Makeyev A. B., Simakova Yu. S., Terekhov E. N. Serpentinities of the melange zone in the north of the Ray-Iz massif, hosting gem garnet (andradite-demantoid). Vestnik of Geosciences, 2024, 7(355), pp. 24–31, doi: 10.19110/geov.2024.7.3



обнаружены и на Полярном Урале в альпинотипных ультрабазитовых массивах в зонах меланжа на северном контакте массива Рай-Из и западном контакте массива Сьум-Кей (Макеев, Брянчанинова, 1999), в этих же зонах встречаются также жилы родингитов (рис. 1).

Минеральные составы множества проявлений ювелирного граната подобны и характеризуются неравномерным распределением демантоида по трещинам в серпентинитах (Иванов, 1998; Карасева, Кисин, Мурзин, 2021). Вмещающими породами проявлений граната являются антигорит-бруситовые, хризотил-лизардитовые серпентиниты — породы, характерные для контактового прогрессивного метаморфизма. Мощность жил — от нескольких мм до первых метров, при протяженности в десятки метров. Материалом для настоящего исследования послужили вмещающие серпентиниты (образцы РТМ-1 и РТМ-2) из зоны меланжа в северной части массива Рай-Из (рис. 2). Цель исследований — определение минерального состава серпентинитов и фации метаморфизма.

Методы исследования

Для изучения фазового и химического составов пород фрагменты образцов вмещающих пород были измельчены, очищены под бинокляром от зерен граната, затем дезинтегрированы ультразвуком в дистиллированной воде и высушены при комнатной температуре. Полученные образцы изучены методами рент-

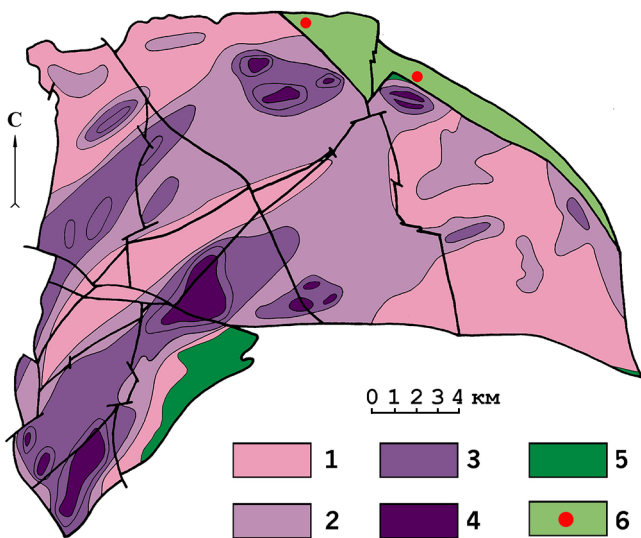


Рис. 1. Карта дунитовой составляющей массива Рай-Из (Макеев, Брянчанинова, 1999):

1 — 0–10 % дунитов (гарцбургит-лерцолитовый комплекс); 2 — 10–30 % дунитов (дунит-гарцбургитовый комплекс); 3 — 30–70 % дунитов (дунит-гарцбургитовый комплекс); 4 — > 70 % дунитов (дунитовый комплекс); 5 — полосчатый дунит-верлит-клинопироксенитовый комплекс; 6 — зона меланжа с проявлениями демантоида

Fig. 1. Map of the dunite component of the Ray-Iz massif (Makeyev, Bryanchaninova, 1999):

1 — 0–10 % dunites (harzburgite-lherzolite complex); 2 — 10–30 % dunites (dunite-harzburgite complex); 3 — 30–70 % dunites (dunite-harzburgite complex); 4 — > 70 % dunites (dunite complex); 5 — banded dunite-wehrlite-clinopyroxenite complex; 6 — melange zone with occurrences of demantoid



Рис. 2. Образцы РТМ-1 (а) и РТМ-2 (б) серпентинитов, вмещающих проявления зеленого граната в северной части массива Рай-Из (фото). Зеленоватые вкрапления и участки — зерна граната

Fig. 2. Samples PTM-1 (a) and PTM-2 (b) serpentinites, hosting occurrences of green garnet in the northern part of the Ray-Iz massif (photo). Greenish inclusions and areas — garnet grains

генофлуоресцентного химического анализа, Фурье ИК- и ЭПР- спектроскопии, рентгеновской дифракции на аппаратуре ЦКП «Геонаука» при ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Состав вмещающих пород определен с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800, Shimadzu (оператор С. Т. Неверов). Выполнен приближённо-количественный экспресс-анализ. Содержание компонентов приведено к 100 % без учёта ППП. Инфракрасные спектры (ИК) были записаны на Фурье-спектрометре Люмекс ФТ-02 в диапазоне 400–4000 см⁻¹ с инструментальным разрешением 2 см⁻¹ по 256 сканам (оператор М. Ф. Самотолкова). Препараты готовились в виде прессованных таблеток 0.8 г KBr с 1.7 мг образцов. Порошковые дифрактограммы образцов пород были получены на дифрактометре DX-2700BH (Dandong Haoyuan Instrument Co., Ltd., China) для излучения Cu_{Kα} (40 кВ, 30 мА) с шагом 2θ 0.05°. К навеске образца подмешивалось небольшое количество кристаллического кремния ($a = 0.54256 \pm 0.00012$ нм) в целях корректировки углов 2θ. ЭПР спектры проб получены на радиоспектрометре SE/X-2547 («RadioPAN», Польша) в X-частотном диапазоне с ВЧ модуляцией 100 кГц амплитудой 0.1 мТ при комнатной температуре. Мощность СВЧ составляла около 7 мВт, навеска около 7 мг. Дополнительно в ИГЕМ РАН выполнен синхронный термический анализ (СТА) серпентинитов с помощью прибора NETZSCH STA 449F1 Jupiter в воздушной атмосфере из навески измельченной породы 40 мг.

Результаты и их обсуждение

Химический состав

Полученные химические составы серпентинитов приведены в табл. 1. Основными компонентами пород являются оксиды кремния и магния в пропорции ~1:1, их содержания близки к значениям, характерным для магнезиальных разновидностей серпентинитов Mg₃Si₂O₅(OH)₄ (MgO — 43.63, SiO₂ — 43.36, H₂O — 13.00 %). Небольшое содержание оксидов алюминия и калия, возможно, относится к включениям слюды или хлори-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) вмещающих пород

Table 1. Chemical composition (wt. %) of the host rocks

Проба / Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO
PTM-1	46.62	2.27	4.58	0.12	41.28	4.71	0.21	0.11	0.10
PTM-2	49.93	2.22	3.78	0.09	42.02	1.56	0.25	0.03	0.12

та, а более высокие содержания оксидов кальция и железа — к примеси граната ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]_3$). Оценка весового содержания андрадита приводит к значениям 10 и 4 % в пробах PTM-1 и PTM-2, соответственно. В образце PTM-1, почти весь оксид железа (97 мас. %) связан в андрадите, а в образце PTM-2 к гранату может быть отнесено только 40 мас. % Fe_2O_3 , а остальная часть, видимо, распределяется в структурах серпентина, примесей слюды и хлорита.

Фурье ИК-спектроскопия

Полученные спектры приведены на рис. 3. Для определения положения пиков использовался сам спектр поглощения и его производные первого и второго порядков. Очевидно, что метод подготовки препаратов ИК в виде таблеток KBr привел к наличию в спектрах ИК-поглощения полос адсорбированной воды. В нашем случае это широкие полосы валентных и деформационных колебаний OH-групп воды в области 3400–3200 и 1630 cm^{-1} , соответственно. Малоинтенсивная полоса в области 1430 cm^{-1} свидетельствует о наличии в пробе следов карбоната. Относительно

узкие линии 888, 832, 813 и плечо 507–510 cm^{-1} относятся к остаткам андрадита во вмещающей породе. В спектре пробы PTM-2 присутствует дублет низкой интенсивности 780 и 798 cm^{-1} , относящийся к кварцу, в спектре PTM-1 он не заметен.

Остальные полосы в спектре можно проинтерпретировать как полосы валентных и деформационных колебаний основных структурных единиц OH и Si–O в решетке глинистых минералов. В спектрах глинистых минералов хорошо проявлена полоса деформационных колебаний OH-групп октаэдрического слоя. В диоктаэдрических глинистых минералах положение полос деформационных колебаний OH-групп попадает в область 950–800 cm^{-1} , (Al_2OH -колебания, каолинит), в то время как поглощение OH триоктаэдрическими минералами (Mg_3OH) смещено в область более низких частот в диапазоне 700–600 cm^{-1} (Madejova, 2003). В ИК-спектрах вмещающих пород (рис. 3) присутствует интенсивная широкая полоса в области 600 cm^{-1} , указывающая на триоктаэдрический мотив структуры, к которому относятся минералы группы серпентина.

В соответствии с классификацией мод колебаний решетки минералов группы серпентина по (Balan et al., 2002), интенсивный пик с максимумом около 3691 cm^{-1} (рис. 3, табл. 2) относится к валентным синфазным колебаниям межслоевых OH-групп октаэдрического слоя, а малоинтенсивный пик 3645 cm^{-1} — к валентным колебаниям внутренней OH-группы октаэдрической сетки (рис. 4).

Интенсивные полосы в диапазоне 960–1100 cm^{-1} принадлежат валентным колебаниям Si–O в плоскости слоев (960 cm^{-1}) и перпендикулярно к ним (1082 cm^{-1} и плечо 1006–1013 cm^{-1}). Полоса сложной формы с главным максимумом 608 cm^{-1} и рядом ее осложнений (688,

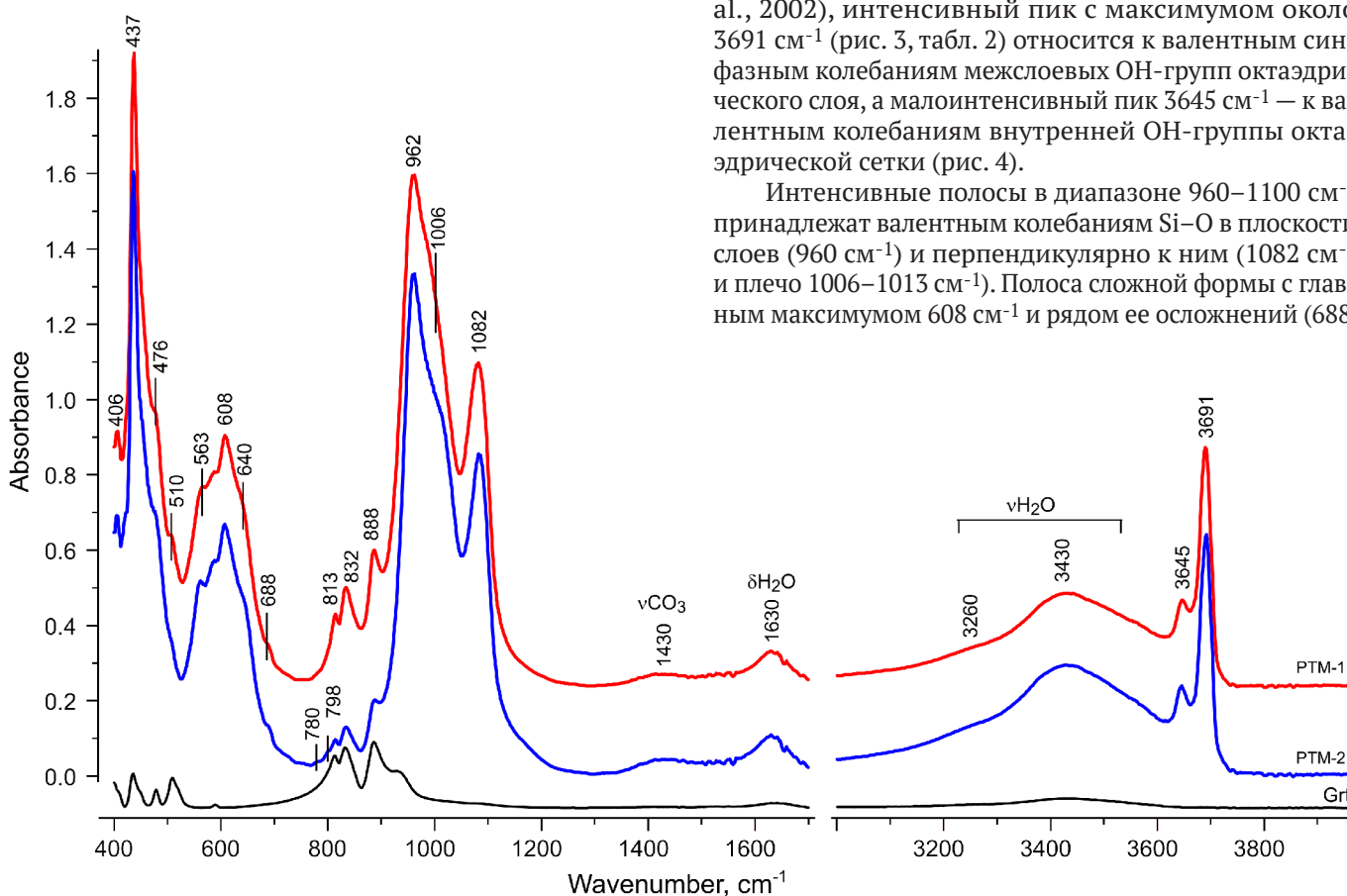


Рис. 3. Спектры ИК-поглощения образцов серпентинитов PTM-1 и PTM-2. Для сравнения в уменьшенном масштабе по оси оптической плотности (absorbance) приведен спектр граната (Grt)

Fig. 3. IR absorption spectra of serpentinite samples PTM-1 and PTM-2. For comparison, the spectrum of garnet (Grt) is shown on a reduced scale along the absorbance axis



Таблица 2. Положения полос ИК-поглощения изученных проб серпентинитов в сравнении с литературными данными по минералам группы серпентина

Table 2. Positions of the IR absorption bands of the studied serpentinite samples in comparison with literature data on serpentine group minerals

PTM-1	PTM-2	Chukanov, 2013			Madejová et al., 2017	
		Ant, Sil18	Liz, Sil116	Hrl, Sil129	Liz	Hrz
3691s	3692s	3682s	3693s	3697s	3687s	3693s
3645w	3644w	3660sh, 3570sh	3655sh, 3590w	3654w	3644w	3647w
1082vs	1084vs	1081vs	1077vs	1075vs	1082vs	1081vs
1006sh	1013sh	—	1015sh	1024s	—	1023
962vs	960vs	981vs	958vs	952svs	959vs	960vs
688sh	688sh	—	—	—	—	—
640sh	640sh	640sh	—	645sh	—	660sh
608s	608s	624s	619s	608s	615s	603s
588w	588w	—	584sh	—	560sh	557sh
563w	564w	571sh	570sh	560sh	—	—
476sh	476sh	—	—	485sh	—	481
437vs	436vs	438s	440s	437s	444s	435s
406w	406w	405w	392w	402w	—	—

Примечание. Градации интенсивности полос: vs — очень интенсивная; s — интенсивная; w — слабая; sh — плечо. Liz — лизардит, Ant — антигорит, Hrз — хризотил

Note. Band intensity gradations: vs — very strong; s — strong; w — weak; sh — shoulder. Liz — lizardite, Ant — antigorite, Hrз — chrysotile

640, 588, 583 cm^{-1}) сформирована несколькими модами деформационных колебаний Mg_3OH . И, наконец, интенсивная сложная полоса с главным максимумом 436–437 cm^{-1} , плечом 476 cm^{-1} и низкоинтенсивным максимумом 406 cm^{-1} сформирована перекрывающимися полосами плоскостных Mg-OH и деформационных Si-O-Si колебаний.

В таблице 2 приведены максимумы полос ИК-поглощения проб PTM-1 и PTM-2 в сравнении с литературными данными по хризотилу, лизардиту и антигориту. ИК-спектры изучаемых образцов по характеристикам полос наиболее близки к хризотилу. Некоторое смещение максимумов полос можно приписать наличию лизардита в составе пород. Различие между спек-

трами образцов PTM-1 и PTM-2 состоит только в немного большей степени разрешения полосы OH 3645 cm^{-1} и низкочастотного плеча полосы 962 cm^{-1} , что, видимо, связано с различным содержанием лизардита. В образце PTM-1 более высокая интенсивность полос 888, 832, 813 cm^{-1} , указывающая на большее содержание в пробах примеси граната.

Рентгеновская дифракция

На дифрактограммах (рис. 5) присутствует серия интенсивных базальных рефлексов серпентина, рефлексы примеси граната, а также следы рефлексов хлорита, слюды, кварца и, возможно, полевого шпата. Интенсивный базальный рефлекс серпентина в области $2\theta = 25^\circ$ у пробы PTM-1 расщеплен, что связано с наличием в пробе двух разновидностей серпентина. У пробы PTM-2 явного расщепления рефлекса не наблюдается. Рефлексы серпентина в этой пробе наилучшим образом описываются политипом ортохризотила (хризотил- Or_1) с орторомбической элементарной ячейкой. Параметры элементарной ячейки (ПЭЯ), наблюдаемые и расчетные межплоскостные расстояния серии рефлексов хризотил- Or_1 пробы PTM-2 даны в таблице 3. Дифрактограмма пробы PTM-1 решена как суперпозиция рефлексов лизардита и хризотила. В отличие от пробы PTM-1 лучший результат расчетов получился в предположении наличия политипа клинохризотила (хризотил- 2M_1). Элементарная ячейка лизардита — тригональная, политип — лизардит-1Т (табл. 3). Представленные значения ПЭЯ, названных разновидностей серпентина в пределах погрешностей определений соответствуют приводимым в работах (Варлаков, 1986; Wicks & O'Hanley, 1988; Burzo, 2009).

ЭПР-спектроскопия

Полученные спектры ЭПР в сравнении со спектром граната-андрадита из этих же пород показаны на рис. 6. В низкополевой части спектров проб PTM-1 и PTM-2 замечен низкоинтенсивный широкий фон, на

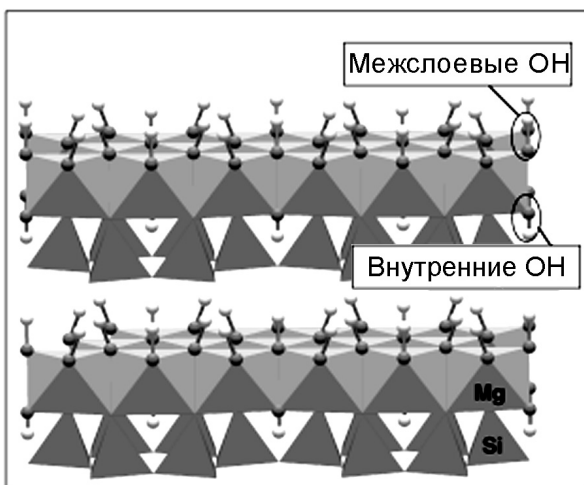


Рис. 4. Структура лизардита-1Т. Межслоевые OH-группы образуют водородную связь с атомами кислорода тетраэдрической сетки следующего слоя (по: Balan et al., 2002 с изменениями)

Fig. 4. Structure of lizardite-1T. Inner-surface OH groups form hydrogen bonds with the oxygen atoms of the tetrahedral network of the next layer. The figure is adapted from (Balan et al., 2002)

который наложены следы относительно узких линий. Широкий фон, вероятно, относится к примесям оксидных фаз железа, а узкие линии, возможно, являются сигналами от следовых количеств ионов Fe^{3+} в минералах серпентина и примесей слюды и хлорита

та (Hall, 1980; Burzo, 2009). В спектре ЭПР пробы РТМ-2 интенсивность структурных примесей Fe^{3+} заметно выше.

В спектрах обеих проб присутствует узкая интенсивная линия лоренцевой формы с g-фактором около

Таблица 3. Параметры элементарной ячейки разновидностей серпентина проб РТМ-1 и РТМ-2 и рефлексы, использованные при расчете

Table 3. Unit cell parameters of the serpentine varieties in the PTM-1 and PTM-2 samples and diffraction reflections used in calculation

Параметры Parameters	PTM-1						PTM-2		
	Лизардит-1Т / Lizardite-1T			Хризотил-2M _{cl} / Chrysotile-2M _{cl}			Хризотил-Or _{cl} / Chrysotile- Or _{cl}		
a, Å	5.30 ± 0.02			5.31 ± 0.02			5.24 ± 0.02		
b, Å	–			9.20 ± 0.03			9.13 ± 0.03		
c, Å	7.29 ± 0.01			14.63 ± 0.02			14.56 ± 0.03		
β, °	–			93.4 ± 0.4			–		
V, Å ³	1771 ± 1			714 ± 4			697 ± 4		

№	PTM-1						PTM-2		
	Лизардит-1Т / Lizardite-1T			Хризотил-2M _{cl} / Chrysotile-2M _{cl}			Хризотил-Or _{cl} / Chrysotile- Or _{cl}		
	hkl	d _{obs} , Å	d _{calc} , Å	hkl	d _{obs} , Å	d _{calc} , Å	hkl	d _{obs} , Å	d _{calc} , Å
1	001	7.296	7.285	002	7.296	7.302	002	7.277	7.279
2	101	3.886	3.884	022	3.886	3.891	020	4.550	4.564
3	002	3.635	3.642	004	3.662	3.651	022	3.884	3.866
4	102	2.832	2.853	201	2.569	2.582	004	3.650	3.639
5	003	2.423	2.428	202	2.461	2.446	201	2.600	2.580
6	202	1.949	1.942	20-4	2.212	2.209	202	2.462	2.466
7	004	1.819	1.821	204	2.084	2.087	204	2.116	2.127
8	113	1.785	1.790	008	1.827	1.825	008	1.820	1.820
9	300	1.538	1.530	060	1.542	1.533	060	1.530	1.521
10	–	–	–	–	–	–	0010	1.450	1.456

Примечание. d_{obs} и d_{calc} — наблюдаемые и расчетные межплоскостные расстояния

Note. d_{obs} and d_{calc} — observed and calculated interplanar spacings

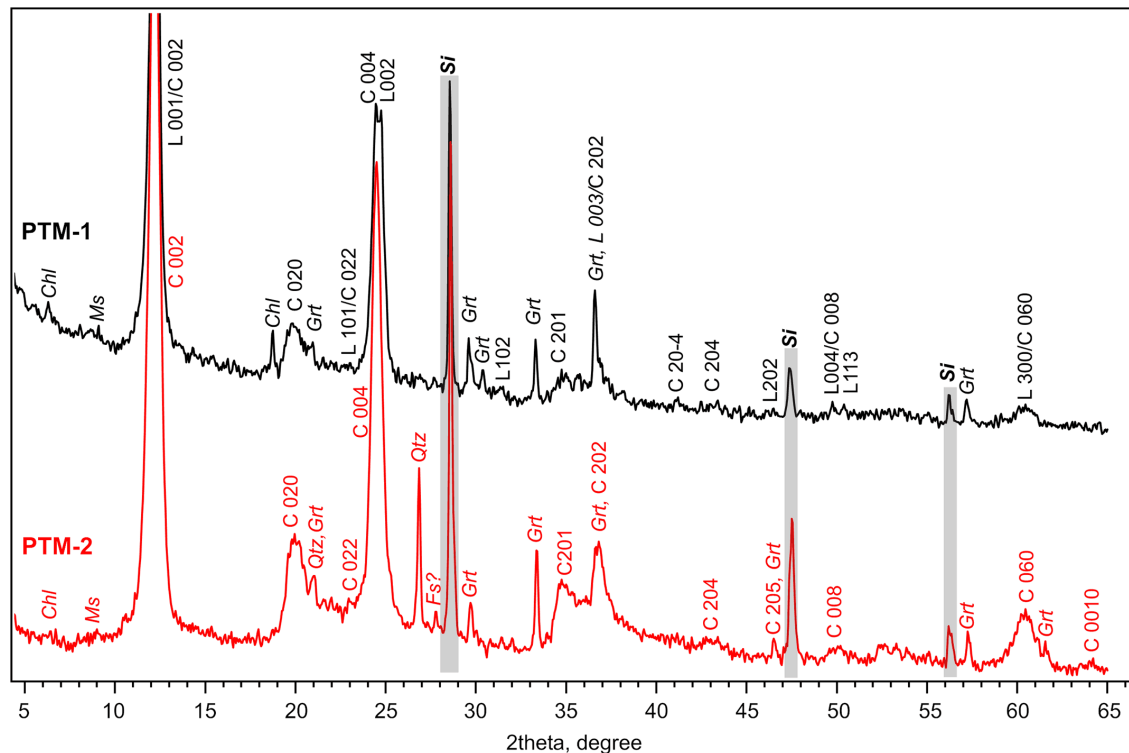


Рис. 5. Диффрактограммы образцов вмещающих пород РТМ-1 и РТМ-2. С hkl и L hkl — рефлексы хризотила и лизардита; Grt, Chl, Ms, Qtz — граната, хлорита, иллита и кварца; Si — эталонного кристаллического кремния

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of host rock samples PTM-1 and PTM-2. C hkl and L hkl are reflections of chrysotile and lizardite; Grt, Chl, Ms and Qtz are reflections of garnet, chlorite, illite and quartz; Si — reflections of reference crystalline silicon



2.00 и шириной 11 мТ, измеренной между точками экстремумов. Точно такой сигнал, но на порядок большей интенсивности при той же навеске, регистрируется у извлеченных из пород кристаллов граната андрадита. Линия относится к обменно-суженному сигналу от ионов Fe^{3+} решетки минерала. Таким образом, интегральная интенсивность данной линии в спектрах проб РТМ-1 и РТМ-2 определяется весовым содержанием в пробах примеси граната. Предположим, что весовое содержание других минеральных фаз (хлорит, слюда) гораздо меньше, чем граната. В таблице 4 показана интегральная интенсивность линий с $g = 2.00$, определенная как произведение амплитуды линии на квадрат ее ширины, и оценка содержания граната в пробах. Как видно на рис. 6 и табл. 4, навеска пробы РТМ-1 содержит около 10 вес. % граната, а пробы РТМ-2 около 4 %. Качественно эти величины хорошо согласуются с оцен-

Таблица 4. Оценка содержания примеси граната в пробах серпентинитов по сигналу ЭПР $g = 2.00 \text{ Fe}^{3+}$

Table 4. Estimation of the garnet content impurities in serpentinite samples according to the EPR signal $g = 2.00 \text{ Fe}^{3+}$

Проба Sample	Интегральная интенсивность, у. е. Integral intensity, c. u.	Содержание андрадита Andradite content	
		Весовые % Weight %	Мольные % Mole %
Гранат Garnet	167	100	100
РТМ-1	16.6	9.9	5.7
РТМ-2	6.35	3.8	2.1

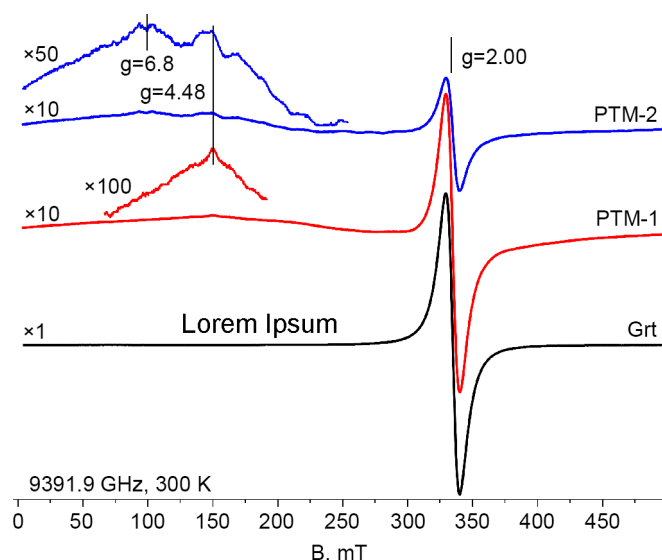


Рис. 6. Спектры ЭПР проб РТМ-1 и РТМ-2 в сравнении со спектром ЭПР граната. Условия записи спектров идентичны, навеска — 7 мг. Слева приведены относительные коэффициенты усиления. Низкополевая часть спектров РТМ-1 и РТМ-2 показана с дополнительным усилением $\times 10$ и $\times 5$ соответственно

Fig. 6. EPR spectra of samples PTM-1 and PTM-2 in comparison with the EPR spectrum of garnet. The conditions for recording the spectra are identical, the sample is 7 mg. On the left are the relative gains. The low-field part of PTM-1 and PTM-2 spectra is shown with additional gain $\times 10$ and $\times 5$ respectively

кой по данным химического анализа. Если гранат представлен андрадитом ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]_3$), а серпентин — чисто магниевым миналом $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, то в мольных % содержание граната в двух пробах составляет 5.7 и 2.1.

Синхронный термический анализ

Большая чувствительность прибора синхронного термического анализа (СТА) позволила с хорошей точностью рассчитать содержание гидроксил- и водосодержащих минералов по потере веса (рис. 7) в определенных температурных интервалах по методике, предложенной в статье (Макеев, Брянчанинова, Модянова, 1985). Методика позволяет разделить петрографические типы лизардита-1Т α и β (Брянчанинова, Макеев, 1995; Макеев, Брянчанинова, 1999), качественно не различающиеся по порошковым дифрактограммам (Варлаков, 1999). Основная потеря массы на кривых СТА (рис. 7) приходится на температурный диапазон 500–900 °С. Она связана с дегидратацией серпентина, которая завершается кристаллизацией форстерита, сопровождающейся интенсивным узким пиком экзоэффекта в районе 810 °С.

Расчет компонентов проб, согласно (Макеев, Брянчанинова, Модянова, 1985), выполнен следующим образом. Потеря веса до температуры 200 °С отнесена к свободной или адсорбированной воде. Потеря веса в интервале 200–500 °С приписывается дегидратации брусита, а в диапазоне 500–900 °С, как уже было отмечено, — дегидратации серпентина. Кривая дифференциальной потери массы (ДТГ) в диапазоне 500–900 °С у пробы РТМ-1 расщеплена на две полосы с экстремумами 630–645 и 670 °С, аналогичное расщепление наблюдается и на полосе эндоэффекта (ДСК). Низкотемпературный эффект относят к дегидратации β -лизардита, а высокотемпературный — α -лизардита. У пробы РТМ-2 наблюдается только эффект дегидратации β -лизардита. Эндоэффект с экстремумом ДСК и ДТГ при 730–740 °С связан с дегидратацией хризотила. На него приходится основная потеря массы пробы РТМ-2, а у пробы РТМ-1 основная потеря массы связана с дегидратацией фаз лизардита.

Потеря массы в интервале 900–1000 °С связывается с распадом тремолита; у пробы РТМ-1 замечен эндоэффект ДСК тремолита при 900 °С. Рассчитанные весовые содержания названных гидроксил-содержащих минеральных фаз даны в табл. 5. Полученные количественные данные о распределении фаз серпентина соответствуют качественной диагностике по данным рентгеновской дифракции и ИКС. Несколько меньшие содержания фазы серпентина по данным СТА, в сравнении с расчетными по химическому анализу, связаны с различной методикой подготовки препаратов. При анализе СТА использовалась валовая проба вмещающих пород, в то время как для химических и спектроскопических исследований использованы обогащенные на серпентин препараты. Возможно, поэтому присутствие в пробах брусита и тремолита методами ИКС и рентгеновской дифракции также не установлено.

По установленной минеральной ассоциации β -лизардит + хризотил серпентиниты зоны меланжа Райизского массива, вмещающие минерализацию ювелирного граната андрадита-демантоида, относятся к хризотиловой фации прогрессивного контактового метаморфизма (Макеев, Брянчанинова, 1999). Следует

отметить, что эта хризотилитовая фация развивается по более ранней лизардитовой (Brs+ α -Liz) регрессивной (зеленосланцевой) фации метаморфизма, она использует воду, выделившуюся при нагреве ранних водных минералов лизардитовой фации (Брянчанинова, Дубинина, Макеев, 2004) при прогрессивном метаморфизме этой ранней минеральной ассоциации. Реликты минералов ранней лизардитовой фации — брусит и α -лизардит — фиксируются на термограмме (рис. 7, а) образца серпентинита РТМ-1.

Закключение

Согласно данным рентгеновской дифракции, термограммам, ИКС, ЭПР, пробы представлены серпентинитом с примесью граната и следовыми количествами слюд и хлорита. Весовое содержание граната в пробах РТМ-1 и РТМ-2 составляет ~10 и ~4 %. Серпентинит проб относится к высокомагнезиальным разновидностям — лизардиту и хризотилу. Повышенное содержание в составе серпентинита пробы РТМ-2 железа согласуется с относительно высокими интенсивностями линий

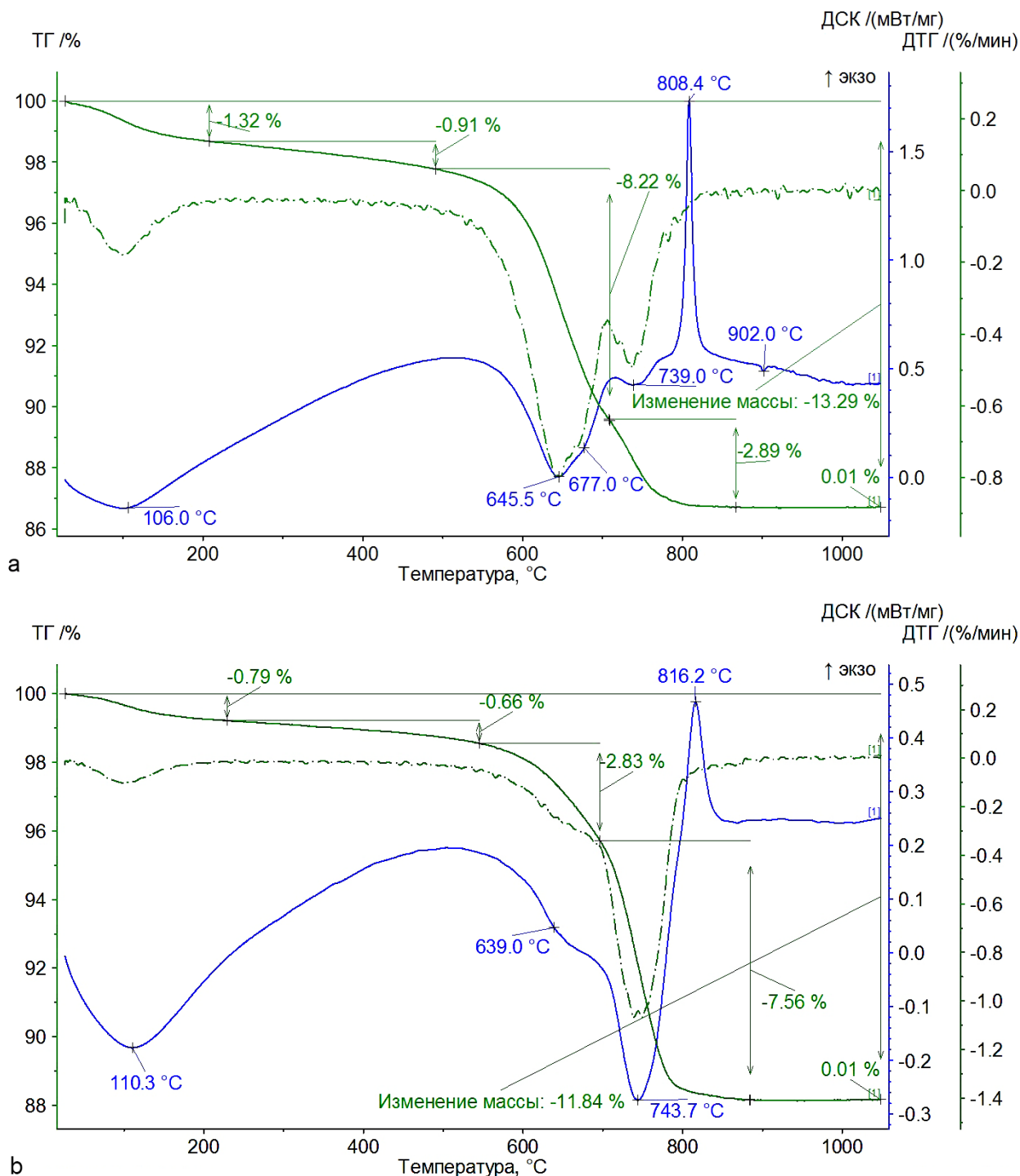


Рис. 7. Термограммы серпентинитов — вмещающих пород проявлений андрадита-демантоида: а — проба РТМ-1, б — проба РТМ-2. Сплошная зеленая линия — потеря массы (ТГ); штрих-пунктирная зеленая линия — дифференциальная потеря массы (ДТГ); синяя линия — дифференциально сканирующая калориметрия (ДСК)

Fig. 7. Thermograms of serpentinites — host rocks of andradite-demantoid occurrences: а — sample РТМ-1, б — sample РТМ-2. Solid green line — mass loss (TG); dash-dotted green line — differential mass loss (DTG); blue line — differential scanning calorimetry (ДСК)



Таблица 5. Состав гидроксилсодержащих минералов вмещающих пород проявлений демантоида массива Рай-Из по данным термического анализа

Table 5. Composition of hydroxyl-containing minerals in the host rocks of the demantoid occurrences of the Ray-Iz massif according to thermal analysis data

Проба Sample	Brs	β-Liz	α-Liz	Hrz	Trm	ΣSpn
PTM-1	2.94	49.37	15.35	22.76	0.25	90.67
PTM-2	2.13	22.28	—	59.53	0.25	84.19

Примечание. Минералы: Brs — брусит, Liz — лизардит, Hrз — хризотил, Trm — тремолит

Note. Minerals: Brs — brucite, Liz — lizardite, Hrз — chrysotile, Trm — tremolite

ЭПР Fe³⁺ в области низких полей, относящимися к замещающим ионам в структуре минерала. Термический анализ подтверждает результаты диагностики серпентинов и, кроме того, позволяет количественно рассчитать содержание его разновидностей. Установлена хризотиловая фация метаморфизма вмещающих серпентинитов.

Авторы благодарят сотрудников ЦКП «Геонаука», а также Н. М. Боеву (ИГЕМ РАН) за помощь в проведении аналитических исследований.

Исследования выполнены в рамках тем НИР госзаданий ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (122040600009-2; FUUU-2022-0058), ИГЕМ РАН (FMMN-2024-0015_Металлогения-ПТНИ 2025-2027) и ГИН РАН.

Литература / References

- Брянчанинова Н. И., Дубинина Е. О., Makeyev A. B. Геохимия изотопов водорода хромитонесущих ультрабазитов Урала // Докл. РАН, 2004. Т. 395. № 3. С. 392–396.
- Brianchaninova N. I., Dubinina E. O., Makeyev A. B. Geochemistry of hydrogen isotopes of chromite-bearing ultrabases of the Urals. Doklady Earth Sciences, 2004, V. 395, No. 3, pp. 392–396. (in Russian)
- Брянчанинова Н. И., Makeyev A. B. Методика исследования серпентинизации ультрабазитов // Минеральные индивиды, агрегаты, парагенезисы. Сыктывкар, 1995. С. 4–11. (Тр. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН, вып. 88).
- Brianchaninova N. I., Makeyev A. B. Methodology for studying the serpentinization of ultrabases. Mineral individuals, aggregates, parageneses. Syktyvkar, 1995, pp. 4–11. (Proceedings of the Institute of Geology Komi SC UB RAS, issue 88). (in Russian)
- Варлаков А. С. Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск, 1986. 224 с.
- Varlakov A. S. Petrology of serpentinization processes of hyperbasites of folded areas. Sverdlovsk, 1986, 224 p. (in Russian)
- Варлаков А. С. Серпентины ультраосновных пород Урала // Уральский минералогический сборник. 1999. № 9. С. 78–109.
- Varlakov A. S. Serpentes of ultrabasic rocks of the Urals. Ural Mineralogical Collection, 1999, No. 9, pp. 78–109. (in Russian)
- Иванов О. К. Генезис демантоидных месторождений Урала // Уральский геологический журнал. 1998. № 1, С. 19–21.

Ivanov O. K. Genesis of demantoid deposits in the Urals. Ural Geological Journal, 1998. No. 1. pp. 19–21. (in Russian)

Карасева Е. С., Кисин А. Ю., Мурзин В. В. Полдневское месторождение демантоидов (Средний Урал): геология и минералогия // Литосфера. 2021. Т. 21. С. 683–698

Karaseva E. S., Kisin A. Yu., Murzin V. V. Poldnevskoe demantoid deposit (Middle Urals): geology and mineralogy. Lithosphere, 2021, V. 21, pp. 683–698. (in Russian)

Макеев А. Б., Брянчанинова Н. И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. СПб.: Наука. 1999. 252 с.

Makeyev A. B., Brianchaninova N. I. Topominerology of ultramafic rocks of the Polar Urals. St. Petersburg: Nauka, 1999, 252 p. (in Russian)

Макеев А. Б., Брянчанинова Н. И., Модянова Г. Н. Особенности серпентинизации ультраосновных пород массива Рай-Из // Минералы и минералообразование. Сыктывкар, 1985. С. 80–86. (Тр. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН, вып. 50).

Makeyev A. B., Brianchaninova N. I., Modyanova G. N. Features of serpentinization of ultramafic rocks of the Rai-Iz massif. Minerals and Mineral Formation. Syktyvkar, 1985, pp. 80–86. (Proceedings of the Institute of Geology Komi SC UB RAS, issue 50). (in Russian)

Макеев А. Б., Терехов Е. Н. Ювелирный демантоид (андрадит) из внешних зон метаморфизма ультрабазитовых массивов Среднего и Полярного Урала // Материалы XI Международной научной конференции молодых ученых «Молодые — Научкам о Земле». МГРИ. М. 2024. С. 319–323.

Makeyev A. B., Terekhov E. N. Jewelry demantoid (andradite) from the outer zones of metamorphism of ultramafic massifs of the Middle and Polar Urals. Proc. of the 11th International Scientific Conference of Young Scientists «Youth for Earth Sciences». MIGE, Moscow, 2024, pp. 319–323 (in Russian)

Balan E., Saitta A. M., Mauri F., Lemaire C., Guyot F. First principles calculation of the infrared spectrum of lizardite // American mineralogist, 2002. V. 87. P. 1286–1290.

Burzo E. Serpentes and related silicates / In H.P.J. Wijn (ed.) Magnetic Properties of Non-Metallic Inorganic Compounds Based on Transition Elements. V. 2715β. Landolt-Börnstein Group III: Condensed Matter. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-71211-4_4.

Chukanov N. V. Infrared spectra of mineral species. Extended library / Springer Geochemistry/Mineralogy. Springer Dordrecht, 2013. 1726 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7128-4.

Hall P. L. The application of electron spin resonance spectroscopy to studies of clay minerals: I. Isomorphous substitutions and external surface properties // Clay Minerals, 1980. V. 15. P. 321–335.

Madejová J. FTIR techniques in clay mineral studies // Vibrational Spectroscopy, 2003. V. 31. P. 1–10.

Madejová J., Gates W.P., Petit S. IR Spectra of Clay Minerals / In: W.P. Gates, J.T. Klopogge, J. Madejová, F. Bergaya (Ed.) Developments in Clay Science, 2017. V. 8. P.107–149. DOI: 10.1016/B978-0-08-100355-8.00005-9.

Wicks F. J., O'Hanley D. S. Serpentine minerals: structures and petrology / In S. W. Bailey (Ed.) Hydrous Phyllosilicates: (Exclusive of Micaceous). Berlin, Boston: De Gruyter, 1988. P. 91–168. DOI: 10.1515/9781501508998-010.

Поступила в редакцию / Received 24.06.2024



300 лет Российской академии наук 300 years of Russian Academy of Sciences

УДК 553.04:069.02:5 (470.13)

DOI: 10.19110/geov.2024.7.4

Репрезентативность фондов Геологического музея им А. А. Чернова для изучения бокситообразования на Тимане

Л. Р. Жданова, И. С. Астахова

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

В Геологическом музее им. А. А. Чернова собрана представительная коллекция, характеризующая процессы бокситообразования на Тимане. В фондах насчитывается 12 соответствующих коллекций объемом 871 единица хранения, проанализирована история комплектования фондов. Собрание музея позволяет полноценно охарактеризовать литологический и минеральный состав, проследить ход формирования месторождений от материнских пород до развития по ним профиля выветривания с образованием латеритной зоны бокситов. Охарактеризованы минеральные типы бокситов, парагенезис аксессуарных минералов в них. Выявлено, что данные по музейным образцам только на 40 % отражают полный кадастр слагающих бокситы минералов. Сделан прогноз результатов новых исследований музейных коллекций, способных значительно расширить знания о процессах бокситообразования.

Ключевые слова: бокситы, минералогия, месторождения, Тиман, музей, фонды

Representativeness of the funds of the A. A. Chernov Geological Museum for the study of bauxite formation on Timan

L. R. Zhdanova, I. S. Astakhova

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The A. A. Chernov Geological Museum compiled a representative collection characterizing the processes of bauxite formation in Timan. The funds include 12 corresponding collections with a volume of 871 storage units; the history of acquisition of the funds has been analyzed. The museum collection allows fully characterizing the lithological and mineral composition, tracing the formation of deposits from source rocks to the development of a weathering profile along them with the formation of the laterite zone of bauxite. The mineral types of bauxites and the paragenesis of accessory minerals in them are characterized. It was revealed that only 40% of museum collections reflect the complete inventory of the minerals that make up bauxite. A forecast of the results of new studies of museum collections is made, which can significantly expand knowledge about the processes of bauxite formation.

Keywords: bauxite, mineral types, deposits, Timan, museum, funds

Введение

В связи с возрастающим интересом современных исследователей к собранию геологических коллекций в фондах музеев приобретают актуальность новая информация о структуре, качественном и количественном составе коллекционных образцов, научное совершенствование музейных экспозиций для более глубокого понимания геологических процессов и повышения качества геологического образования. Большое значение имеют монографические описания коллекций в опубликованных научных работах, поскольку на таких описаниях учатся молодые исследователи и их используют организаторы тематических выставок. Музейные коллекции имеют также мемориальное значение, материально демонстрируя историю открытия и изучения месторождений в течение многих десяти-

летий научными сотрудниками в стенах одного учреждения.

Целью данной статьи является оценка представительности фондов Геологического музея им. А. А. Чернова на примере продуктов бокситообразования на Тимане, прогноз перспективы их исследований с использованием современных аналитических методов и разработки новых приемов экспонирования геологических материалов.

Краткая история открытия и изучения бокситов Тимана

Открытие промышленных залежей бокситовых месторождений на Южном и Среднем Тимане пришлось на 1970–80-е годы, но этому событию предше-

Для цитирования: Жданова Л. Р., Астахова И. С. Репрезентативность фондов Геологического музея им А. А. Чернова для изучения бокситообразования на Тимане // Вестник геонаук. 2024. 7(355). С. 32–40. DOI: 10.19110/geov.2024.7.4

For citation: Zhdanova L. R., Astakhova I. S. Representativeness of the funds of the A. A. Chernov Geological Museum for the study of bauxite formation on Timan. Vestnik of Geosciences, 2024, 7(355), pp. 32–40, doi: 10.19110/geov.2024.7.4



ствовал долгий период изучения в этом регионе палеозойских кор выветривания, продуктов их переотложения и глиноземсодержащих пород.

История открытия тиманских бокситов началась с обнаружения Б. А. Лихаревым в 1929 г. в верхнем течении р. Вычегды (Южный Тиман) глинистых пород с содержанием глинозема до 39.28 мас. %. На Среднем Тимане похожие глины были обнаружены в 1933 г. (Плякин, Лысов, Лушков, 2003; Минин, 2018). Однако все эти находки большого интереса у геологов не вызвали, так как кремниевый модуль в них оказался низким. В те годы алюминиевая промышленность СССР была полностью обеспечивалась импортным сырьем. Тем не менее на Второй геологической конференции Коми АССР в 1944 г. проф. А. А. Черновым была выдвинута идея о целесообразности поисков бокситов на Тимане: *«Третьей, но очень отдаленной проблемой нам рисуются поиски алюминиевых руд и создание соответствующей промышленности. Эти руды, главным образом бокситы, есть основания искать и на Урале и, может быть, еще больше на Тимане»* (Чернов, 1947, с.28). Кондиционные бокситы на Южном Тимане были обнаружены геологами Ухтокомбината уже в 1949 г. в керне опорной скв. № 1-Зеленец, пробуренной в нижнекаменноугольных терригенных отложениях. Это послужило основанием для организации специализированных поисковых работ на бокситы. В 1954–1957 гг. соответствующие научно-исследовательские и поисково-оценочные работы проводились соответственно партией ВИМС и Южно-Тиманской партией Северо-Западного геологического управления под руководством В. И. Горского-Кручинина (Беляев, Яцкевич, Швецова, 1997). Но результаты этих работ были признаны отрицательными, перспектив на бокситы они не продемонстрировали, хотя несколько бокситопроявлений при этом было выявлено.

С начала 1960-х годов начался новый этап изучения бокситоносности Тимана. На Южном Тимане проводились работы Ухтинской ГРЭ, в ходе которых были открыты пять промышленных месторождений бокситов — Тимшерское, Пузлинское, Эжвадорское, Верхневольское и Черское. Впоследствии к исследованиям бокситопроявлений на Тимане были привлечены многие отечественные организации и предприятия. Научные исследования проводили сотрудники ИГЕМ АН СССР (В. А. Калюжный и В. Н. Демин), Ухтинского индустриального института (О. С. Кочетков, Э. Я. Яхнин), ВИМС (О. В. Шумов, И. В. Нижний) и др. Южный Тиман в эти годы считался одним из перспективных на бокситы районов страны.

Первые находки кондиционных бокситов на Среднем Тимане были сделаны в 1970 г. при картировании Четласской структуры коллективом геологов Ухтинской ГРЭ. Из шурфа № 4 на Верхневорыквинской площади была отобрана проба длиной 1.2 м, которая показала содержание в ней глинозема 41.51 % при значении кремниевого модуля 5.42 (Плякин, 2009). С 1972 года в этом районе УГРЭ начала проводить планомерные поиски бокситов, которые привели к открытию Вежаю-Ворыквинского месторождения. Большая заслуга в последовавшем открытии Верхнешугорского, Восточного, Заостровского, Володинского и Светлинского месторождений принадлежит геологам В. П. Абрамову, Г. П. Гуляеву, В. А. Зинченко, В. А. Лебе-

деву, И. Ф. Любинскому, Ю. М. Лысову, В. М. Пачукову, А. М. Плякину (Абрамов и др., 1974). Это позволило определить Средний Тиман как важнейший бокситорудный район в СССР. Изучением бокситов Среднего Тимана активно занимались ряд научно-исследовательских институтов и вузов (ИГЕМ, ВИМС, ВСЕГЕИ, Всесоюзный алюминиево-магниевый институт (в настоящее время АО «Русал-ВАМИ»)).

В эти же годы к процессу исследований бокситоносности Тимана подключился Институт геологии Коми филиала АН СССР. В 1966–1970 гг. в планы работы Института геологии была включена тема «Палеозойские коры выветривания Тимана и связанные с ними полезные ископаемые» с разделом «Минералогия и генезис бокситов Южного Тимана». В рамках этой темы фундаментальные и прикладные исследования бокситообразования проводили В. В. Беляев, В. Е. Закруткин, Э. С. Щербаков и И. В. Швецова. Начиная с 1965 г. под руководством В. В. Беляева изучались геология, минералого-геохимический состав, закономерности формирования и размещения бокситоносных кор выветривания и связанных с ними небокситовых высокоглиноземистых пород на Южном и Среднем Тимане (Фишман, 2000). Примечательным является тот факт, что В. В. Беляев является соавтором первой научной публикации о тиманских бокситах как латеритных (Колокольцев и др., 1971). Позже В. В. Беляевым и его коллегами было опубликовано более восьмидесяти работ, заложивших основу современных знаний о промышленной бокситоносности Тиманского региона.

В течение многих лет исследованием минералогии и геохимии тиманских бокситов занимались И. В. Швецова и В. В. Лихачев (Лихачев, 1978; Беляев и др., 1983; Лихачев, Швецова, 1990). Большой вклад в литолого-геохимическое изучение бокситоносных кор выветривания на Южном Тимане внесли сотрудники Института геологии Коми ФАН СССР В. Е. Закруткин и С. В. Колесников (Бушинский, Закруткин, 1978). В последние годы минералого-технологическими исследованиями бокситов Тимана в связи с оптимизацией их промышленного освоения занимались О. Б. Котова, А. В. Вахрушев и И. Н. Размыслов (Вахрушев, Котова, 2009; Котова и др., 2016; Razmyslov et al., 2019).

Коллекция бокситов Тимана в фондах Геологического музея им. А. А. Чернова

Динамика поступления коллекций бокситов в фонды Геологического музея им. А. А. Чернова перекликается с историей изучения и освоения бокситовых месторождений Тимана — накопление образцов бокситов и вмещающих их пород шло в течение нескольких десятилетий. Среди соответствующих монографических коллекций музея материалы Вячеслава Васильевича Беляева занимают особое место. По учетной записи «Книги поступлений коллекций в музейные фонды» первая монографическая коллекция бокситов была передана В. В. Беляевым еще в 1973 году, будучи привязанной к его диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук «Визейские бокситы Южного Тимана, их минералогия и генезис». На следующий год в фонды музея поступила коллекция В. Е. Закруткина — также после защиты диссертационной работы «Геохимия титана и

малых элементов в бокситах Южного Тимана». В 1975 году коллектив авторов, в который входили В. В. Беляев, В. Е. Закруткин и С. В. Колесников, подвели итоги по изучению месторождений южнотиманских бокситов. В фонды музея с материалами их научного отчета была передана коллекция бокситов с карьеров и шахт Северо-Уральского бокситового района. Позднее данные материалы были дополнены коллекцией В. В. Лихачева и В. В. Беляева с месторождения Красная Шапочка (Северный Урал). С 1970-х годов В. В. Беляев, В. В. Лихачев и И. В. Швецова передавали коллекции с месторождений Среднего Тимана. В связи с формированием отдельных экспозиций для демонстрации результатов бокситообразования на Тимане в зале «Полезных ископаемых» музея стали организовывать выставочные коллекции с крупными, представительными образцами.

На сегодняшний момент в фондах насчитывается 12 коллекций объемом 871 единица хранения. Основная часть собрания характеризует бокситовые месторождения Среднего Тимана — Заостровское, Володинское, Светлинское, Верхнешугорское, Вежаю-Ворыквинское; частично охарактеризованы бокситы южнотиманских

месторождений и проявлений — Северной, Западной, Тимшерской залежей и Верхнеухтинского месторождения (рис. 1).

Известно, что в бокситах Среднего Тимана содержания основных оксидов довольно сильно варьируются (мас. %): Al_2O_3 — 34–76; SiO_2 — 1.5–21; Fe_2O_3 — 2–40; TiO_2 — 2–4.6. Значения кремниевого модуля (Al_2O_3/SiO_2) колеблются в пределах 2.1–50. Соответственно, бокситы непостоянны и по минеральному составу (Беляев, 1976; Беляев и др., 1983; Беляев, 1997). В музейном фонде собраны все их минеральные типы, определенные в соответствии с классификацией, разработанной в ИГЕМ АН СССР (Сапожников, 1974): гематит-бёмитовый; гематит-шамозит-бёмитовый; шамозит-бёмитовый; гематит-каолинит-бёмитовый. Кроме того, в музейной коллекции представлены мономинеральные (бёмитовая, диаспоровая) и промежуточная бёмит-диаспоровая разновидности бокситов (табл. 1).

Гематит-бёмитовый минеральный тип бокситов наиболее широко распространен на Среднем Тимане, особенно в Вежаю-Ворыквинском месторождении. Бокситы этого типа — красные и красно-бурые, маркие и немаркие, по текстурно-структурным свойствам

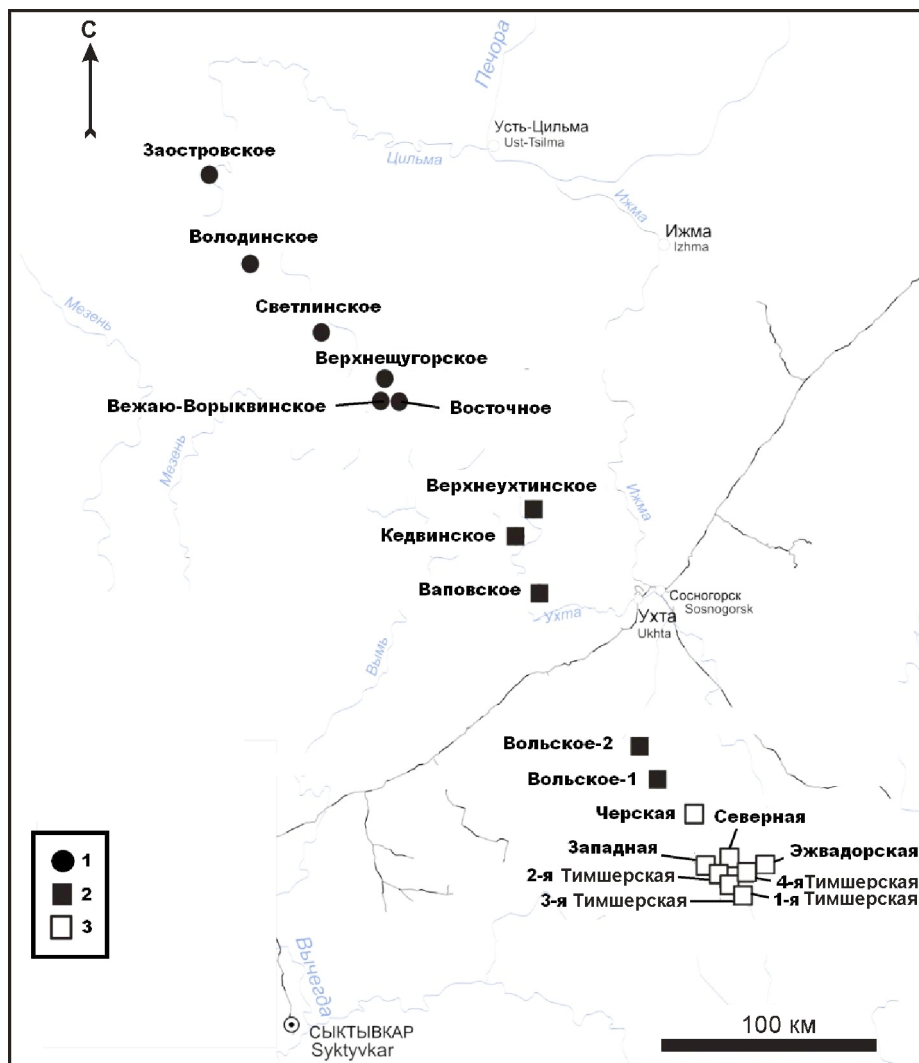


Рис. 1. Схема расположения бокситовых месторождений, коллекции бокситов которых представлены в музее: 1 — Среднетиманские месторождения латеритных бокситов, 2 — Южнотиманские месторождения латеритных бокситов, 3 — Южнотиманские залежи осадочного типа

Fig. 1. Scheme of the location of bauxite deposits from which the museum has bauxite collections: 1 — Central Timan deposits of laterite bauxite, 2 — South Timan deposits of laterite bauxite, 3 — South Timan deposits of sedimentary type



Таблица 1. Минеральные типы бокситов Тимана (Беляев и др., 1997)

Table 1. Mineral types of Timan bauxite (Belyaev et al., 1997)

Типы Type	Гематит- бёмитовый Hematite- boehmite	Гематит- шамозит- бёмитовый Hematite- chamosite- boehmite	Шамозит- бёмитовый Chamosite- boehmite	Гематит- каолинит- бёмитовый Hematite- kaolinite- boehmite	Бёмитовый (бёмита 85%) Boehmite (boeh- mite 85%)	Диаспоровый Diasporic
Месторождение, полевой номер Deposit, field number	Вежаю- Ворыквинское, Vezhayu- Vorykvinskoye 575-9	Вежаю- Ворыквинское, Vezhayu- Vorykvinskoye 577-28	Вежаю- Ворыквинское, Vezhayu- Vorykvinskoye 527-13	Вежаю- Ворыквинское Vezhayu- Vorykvinskoye 582-10	Верхне- щугорское Verkhne- shchugorskoye 3205/255	Восточное Eastern
Музейный номер Museum number	553/161	633/15	633/20	553/163	633/24	666/441
SiO ₂	5.30	10.68	12.20	13.44	0.98	6.10
TiO ₂	2.9	2.50	2.60	2.40	2.60	2.75
Al ₂ O ₃	41.56	46.07	46.24	42.57	57.08	48.41
Fe ₂ O ₃ общ	37.28	24.80	30.42	27.68	25.91	29.01
CaO	0.62	0.34	0.28	0.28	0.18	0.66
S _{общ}	0.02	0.016	0.03	13.23	не обн. not detected	не обн. not detected
ППП / LOI	9.57	12.97	15.16	0.01	»	11.71
Кремниевый модуль Al ₂ O ₃ / SiO ₂ Silicon module	7.84	4.31	3.79	3.17	58.24	7.94

преимущественно брекчиево-обломочные и пелитоморфные со средними значениями кремниевого модуля в пределах 7–8 (рис. 2, а). Второй по распространенности тип бокситов — гематит-шамозит-бёмитовый (рис. 2, б). Он характеризуется высокой плотностью, неравномерно-красным цветом, иногда с желто-зелено-коричневыми пятнами. Его относят к относительно низкомодульным бокситам с содержанием Al₂O₃ 34–52 мас. % и более высоким содержанием железа. Менее распространенным на среднетиманских месторождениях является шамозит-бёмитовый тип бокситов (рис. 2, с). Он более плотный, «каменистый», отличается более блеклой окраской с участками красного, желтого, зеленого, коричневого цвета. Значения кремниевого модуля у этого типа бокситов варьируют в пределах 2.1–3.4. Наиболее редко встре-

чаются низкомодульные бокситы гематит-каолинит-бёмитового типа. Особую группу составляют малозелёные «белые» бокситы бёмитового состава в Северо-Щугорской залежи (рис. 2, d). Количество глинозема в них достигает 78 мас. % при содержании оксидов кремния и железа на уровне первых процентов (Беляев, 2009).

Бокситы Южного Тимана имеют осадочное происхождение, будучи приуроченными к терригенной толще визейского яруса нижнего карбона, сложенной различными фациями осадков — делювиальной, ближнекарстовой, озерно-болотной, аллювиальными русловой и пойменной. На Тимшерском, Пузлинском и Вольском месторождениях преобладают белые аргиллитовидные и бобовые бокситы каолинит-бёмитового состава. Минеральный состав бокситов Кедвинского

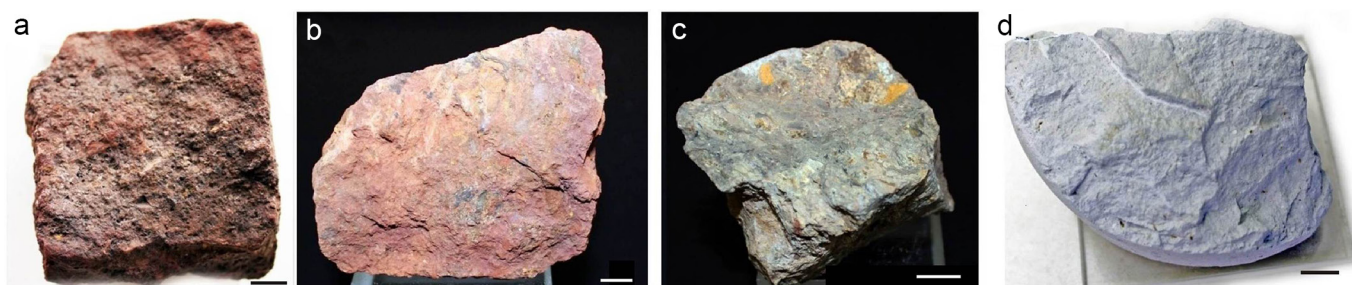


Рис. 2. Минеральные типы среднетиманских бокситов: а — гематит-бёмитовый, № 553/161; б — гематит-шамозит-бёмитовый, № 633/15; с — шамозит-бёмитовый боксит, № 633/20; d — бёмитовый, № 633/24. Масштабная линейка — 1 см

Fig. 2. Mineral types of Central Timan bauxites: а — hematite-boehmite, No. 553/161; б — hematite-chamosite-boehmite, No. 633/15; с — chamosite-boehmite bauxite, No. 633/20; d — boehmite, No. 633/24. Scale bar — 1 cm

месторождения преимущественно каолинит-гипбситовый (Верхнеухтинская залежь) и каолинит-бёмит-гипбситовый (Ваповская залежь). Эти бокситы относят к низкосортным рудам (Беляев, 1974). В коллекциях музея представлены южнотиманские бокситы следующих литологических типов: аргиллитовидного, каменистого, сухаристого, рыхлого (землистого), конкреционного (оолитовые и бобовые), обломочного (пелитоморфные, конгломератовидные, брекчиевидные) и смешанного (оолито-бобово-обломочные).

Наиболее широко распространены на Южном Тимане аргиллитовидные бокситы с пелитоморфным строением (рис. 3, а), реже встречаются аргиллитовые бокситы мелкобобового строения (Беляев, 1974). В музейных фондах такие бокситы представлены образцами с Западной и Северной залежей Южного Тимана. Не имеющие широкого распространения сухаристые и каменистые разновидности бокситов (рис. 3, б, в) представлены образцами с Северной залежи Южного Тимана и Вежаю-Ворыквинского месторождения Среднего Тимана. Под четвертичными отложениями чаще всего встречается рыхлая или землистая литологическая разновидность боксита.

В музейных коллекциях представлены бокситы с бобово-обломочной, брекчиевидной-обломочной вплоть до брекчиевидной текстурами (рис. 4, а, б), характерными как для делювиальных (осадочных), так и для карстовых (гипергенных) обстановок. По мнению специалистов, определить латеритную природу брекчиевидных бокситов особенно сложно (Беляев и др., 1976). О ней может свидетельствовать неправильная и остроугольная форма обломков, не подверженных какой-

либо сортировке. В переотложенных бокситах обломки в той или иной мере хорошо окатаны и имеют округлую форму. Кроме того, осадочные бокситы чаще всего обладают пелитоморфной структурой (рис. 4, в).

Много лет исследованиями минералогии и геохимии среднетиманских бокситов занималась Ирина Владимировна Швецова. Именно она выявляла и изучала акцессорные минералы в бокситах и подстилающих их породах, определяла и анализировала их парагенезисы и парастерезисы. В результате было установлено, что в бокситоматеринские субстраты входили сланцево-доломитовые породы, сложенные обломочными, метаморфогенными и метасоматическими минералами, реликтивно сохранившимися в бокситах (Швецова, 1979; Лихачев, Швецова, 1990). Обнаружение в бокситах Верхнещугорского месторождения Cu-Co-Ni-As-сульфидов позволило предположить наличие в составе выветривающихся субстратов соответствующих минерализаций.

Музейный кадастр акцессорных минералов из среднетиманских бокситовых месторождений включает 36 минералов, что соответствует только 44 % полного кадастра соответствующих минералов (табл. 2). Коллекция представляет собой набор монофракций минералов, которые в разной степени характеризуют генетические ассоциации акцессорных минералов. Наиболее представительны группы метаморфогенных и аутигенных минералов.

На разных площадях месторождений Среднего Тимана субстратом бокситов служили разные породы. На Вежаю-Ворыквинской и Южно-Щугорской площадях доминируют бокситы, развитые на субстрате гли-



Рис. 3. Литологические разновидности южнотиманских бокситов: а — аргиллитовидная, № 576/19; б — каменистая, № 553/163; в — сухаристая, № 576/12. Масштабная линейка — 1 см

Fig. 3. Lithological varieties of South Timan bauxites: а — mudstone, № 576/19; б — rocky, № 553/163; в — dry, № 576/12. Scale bar — 1 cm

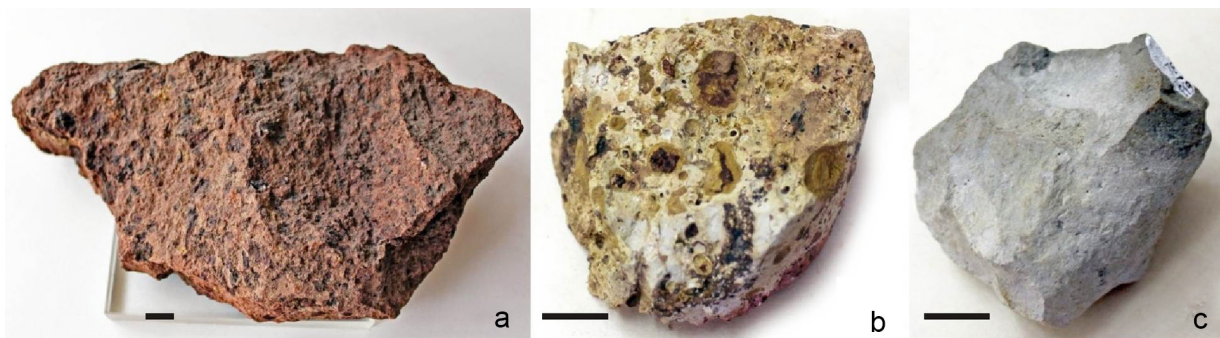


Рис. 4. Южнотиманские бокситы с текстурно-структурными особенностями: а — брекчиевидный, № 553/54; б — аргиллитовидный обломочно-бобовый, № 576/15; в — аргиллитовидный пелитоморфный, № 633/31. Масштабная линейка — 1 см

Fig. 4. South Timan bauxites with textural and structural features: а — breccia-like, № 553/54; б — mudstone clastic-bean type, № 576/15; в — argillite-like pelitomorphic, № 633/31. Scale bar — 1 cm



Таблица 2. Генетические ассоциации аксессуарных минералов бокситов и кор выветривания Среднетиманских месторождений (Швецова, 1979; Shvecova, 1979; Беляев и др., 1997)

Table 2. Genetic groups of accessory minerals of bauxites and weathering crusts of Middle Timan deposits (Shvetsova, 1979; Shvecova, 1979; Belyaev et al., 1997)

Группы Groups	Минералы Minerals	Число минералов в кадастре Number of minerals in the cadastre	Число минералов в фонде музея Number of minerals in the museum fund
Аллотигенные Allothigenic	Циркон, рутил, анатаз , ильменорутит, гранат, ильменит, титанит, турмалин, кианит, лейкоксен Zircon, rutile, anatase , ilmenorutile, garnet, ilmenite, titanite, tourmaline, kyanite, leucoxene	10	4
Метаморфогенные Metamorphogenic	Рутил, анатаз, эпидот , гранат, турмалин, кианит, ставролит, ильменит, лейкоксен, магнетит, марказит, халькопирит, галенит Rutile, anatase, epidote , garnet, tourmaline, kyanite, staurolite, ilmenite, leucoxene, magnetite, marcasite, chalcopyrite, galena	13	9
Метасоматические Metasomatic	Апатит , подолит, иттрий-апатит, беловит, монацит , ксенотим, циркон, рутил, анатаз, ильменорутит, колумбит, пироклор, плюмбопироклор , барит, титанит, турмалин, флюорит, ильменит, лейкоксен , магнетит, муассонит, самородная медь, самородный цинк, никелин , молибденит, борнит, вурцит, сфалерит, галенит , марказит, пирит, кальцит, целестин, барит, торит, эпидот, цитролит, циркон, ферроклумбит , торинанит, гематит Apatite , podolite, yttrium-apatite, belovite, monazite , xenotime, zircon, rutile, anatase, ilmenorutile, columbite, pyrochlore, plumbopyrochlore , barite, titanite, tourmaline, fluorite, ilmenite, leucoxene , magnetite, moissonite, native copper, native zinc, nickel , molybdenite, bornite, wurtzite, sphalerite, galena , marcasite, pyrite, calcite, celestine, barite, thorite, epidote, cyrtolite, zircon, ferroclumbite , thorianite, hematite	44	14
Аутигенные Authigenic	Барит, пирит, халькопирит, галенит , сфалерит, халькозин, кобальтин, раммельсбергит, вудхаузеит, соколовит, флоренсит, гойяцит, сванбергит , горсейксит Barite, pyrite, chalcopyrite, galena , sphalerite, chalcocite, cobaltite, rammelsbergite, wudhouseite, sokolovite, florensite, goyacite, svanbergite , horseyksite	14	9
Сумма минералов / Sum of minerals		81	36

Примечание. Жирным шрифтом обозначены минералы, хранящиеся в фондах Геологического музея им. А. А. Чернова
Note. Bold font indicates minerals stored in the collections of the Chernov Geological Museum

нистых, карбонатно-глинистых и глинисто-карбонатных сланцев, а также на переотложенных продуктах выветривания этих пород. На Верхневорыквинском месторождении бокситы развивались по туфам и частично по подстилающим туфы рифейским сланцам. На Северо-Шугорской площади установлены субоминеральные бокситы, которые образовались за счет карбонатно-полевошпатовых метасоматитов в складчатом фундаменте (Георгиевский, и др., 2011). Стадийное изменение одного из главных в метасоматитах породообразующих минералов — полевого шпата — происходило в последовательности: полевой шпат → гидрослюда → каолинит → бемит. Кроме каолинита и бемита в данном процессе участвуют оксиды и оксигидроксиды железа — гематит, гидрогематит, меньше гётит. Железистые бокситы подразделяются на ка-

олинит-гематит-бёмитовые и гематит-бёмитовые (Беляев, Лихачев, Швецова, 1983). Описанная выше схема выветривания полевошпатовых метасоматитов тоже относится к латеритному типу, а связанные с нею бокситы являются остаточными продуктами гипергенеза. Направленность процесса выветривания и последовательность превращения субстратов в боксит реализуются довольно однообразно, хотя составы зон в гипергенных профилях, возникающих на различных субстратах, могут несколько различаться (Беляев, 1997).

Фондовый материал музея позволяет наиболее полно отразить литолого-геохимические профили выветривания по сланцево-карбонатному субстрату и по полевошпат-карбонатным метасоматитам. В зале «Полезные ископаемые» представлены серии образцов от материнских пород до бокситов, являющихся

продуктами их гипергенного преобразования со всеми переходными разновидностями. Примером может служить профиль выветривания по метасоматитам на Верхнечугорском месторождении (рис. 5).

Наряду с исследованиями в Институте геологии велись работы по совершенствованию методов обогащения бокситов (Беляев, 2009). В частности, рассматривались вариации методов обогащения бокситов в зависимости от их минерально-фазового состава, например, среднетиманских бокситов бессернистого каолинит-гипсита и сернистого каолинит-бёмитового состава (коллекция В. А. Вахрушева). При существующих технологиях бокситы первого типа могут вводиться в технологические схемы без предварительной подготовки, тогда как большая часть бокситов второго типа в вышеуказанных отраслях производства возможна лишь после удаления серы по ГОСТу (Вахрушев и др., 2009). Обсуждалась также перспектива нетрадиционного использования бокситов, а также вскрышных и вмещающих пород, отходов глиноземного производства. Так, были выявлены возможности получения электропроводящей керамики на основе маложелезистых высокомодульных бокситов (Голдин

и др., 1992). В последние годы проводятся успешные эксперименты по технологическому модифицированию первичного бокситового сырья с использованием радиационно-термических методов (Котова и др., 2016; Razmyslov et al., 2019).

Выводы

Огромный фактический материал с бокситовых месторождений Южного и Среднего Тимана сосредоточен в монографических коллекциях музея, большинство которых литолого-минералого-геохимически охарактеризовано в многочисленных публикациях. В музейных экспозициях и фондах представлены все геолого-генетические и минеральные типы бокситов и сопряженных с бокситами метаморфических, метасоматических и осадочных горных пород. Эти материалы всесторонне отражают процессы латеритного и осадочного бокситообразования. Вместе с тем остается еще много вопросов, решение которых требует продолжения исследований с использованием современных рентгенофлуоресцентных, рентгенодифракционных, электронно-микроскопических, спектроскопи-

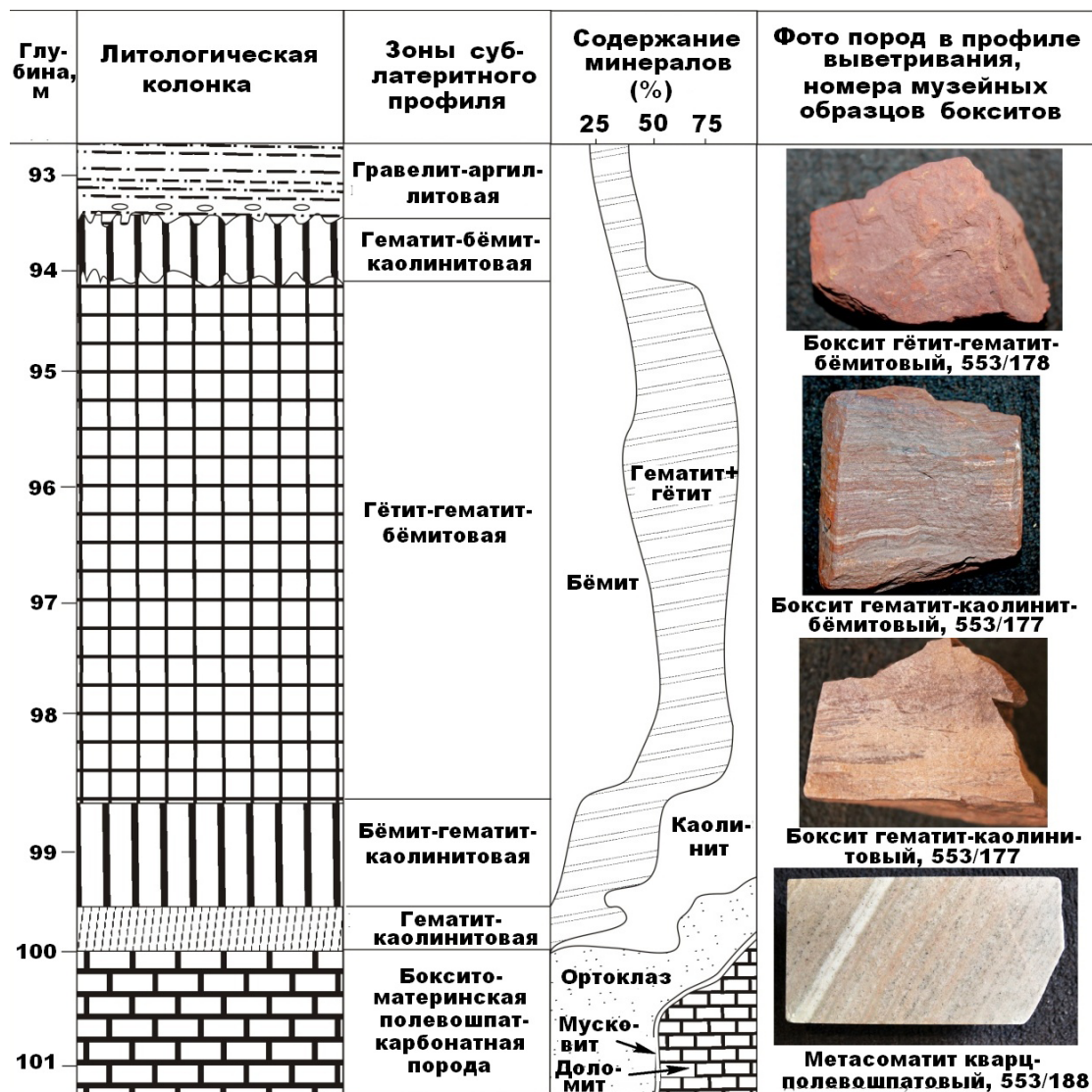


Рис. 5. Литолого-минералогический профиль выветривания полевошпат-карбонатных метасоматитов (Беляев и др., 1997)

Fig. 5. Lithological-mineralogical weathering profile for feldspar-carbonate metasomatites (Belyaev et al., 1997)



ческих и масс-спектроскопических методов. В этой связи остается актуальным высказывание В. В. Беляева: «Выводы по ряду проблемных вопросов бокситообразования в районе нередко делались исключительно исходя из теоретических воззрений, которых придерживался автор, или на основе изучения частных разрезов бокситоносной формации на одном из участков, а затем распространялись на весь бокситоносный район». Ярким подтверждением востребованности каменного материала для повторных исследований стало обнаружение в музейной коллекции нового минерала из супергруппы колумбита — *дмитрийварламовита* $Ti_2(Fe^{3+}Nb)O_8$, который был обнаружен в образце В. В. Лихачева выветрелых щелочных метасоматов, образовавшихся по позднерифейским карбонатным породам Верхнешугорского месторождения (Udoratina et al., 2024).

Фонды Геологического музея им. А. А. Чернова составляют также основу для реализации одной из важнейших музейных функций — обучения и популяризации геологических знаний посредством научно-систематизированных экспозиций. В частности, в зале «Полезные ископаемые» размещена постоянная экспозиция, посвященная бокситам Тимана. В витринах демонстрируются образцы латеритных и осадочных бокситов, представлены их основные минералогические типы, материнские породы, охарактеризованы профили выветривания. Эти экспозиции указывают на значительный потенциал музейных фондов для проведения новых научных исследований и совершенствования программ обучения в области экспериментального естествознания.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГР № 1220406 00011-5.

Литература / References

- Абрамов В. П., Лебедев В. А., Лысов Ю. М., Смирнов В. Г. Латеритные бокситы Тимана // Семинар по генезису бокситов. М., 1974. С. 187–189.
Abramov V. P., Lebedev V. A., Lysov Yu. M., Smirnov V. G. Timan laterite bauxites. Seminar on bauxite genesis. Moscow, 1974, pp. 187–189. (in Russian)
- Беляев В. В. Минералогия и генезис бокситов Южного Тимана. Л.: Наука, 1974. 183 с.
Belyaev V. V. Mineralogy and genesis of South Timan bauxite. Leningrad: Nauka, 1974, 183 p. (in Russian)
- Беляев В. В., Швецова И. В., Лихачев В. В. Бокситы Среднего Тимана и перспективы их поисков. Сыктывкар, 1976. 36 с. (Научные доклады: Сер. препринтов / Коми филиал АН СССР; Вып. 29).
Belyaev V. V., Shvetsova I. V., Likhachev V. V. Bauxites of the Middle Timan and prospects for their search. Syktyvkar, 1976, 36 p. (Preprints «Scientific reports». Komi branch USSR AS, 29). (in Russian)
- Беляев В. В., Лихачев В. В., Швецова И. В. Бокситоносная кора выветривания полевошпаттовых метасоматитов на Среднем Тимане. Сыктывкар 1983. 34 с. (Научные доклады: Сер. препринтов / Коми филиал АН СССР; Вып. 91).
Belyaev V. V., Likhachev V. V., Shvetsova I. V. Bauxite-bearing weathering crust of feldspar metasomatites on the Middle Timan. Syktyvkar, 1983, 34 p. (Preprints «Scientific reports», Komi branch USSR AS, 91). (in Russian)
- Беляев В. В., Яцкевич Б. А., Швецова И. В. Девонские бокситы Тимана. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 1997. 198 с.
Belyaev V. V., Yatskevich B. A., Shvetsova I. V. Timan Devonian Bauxites. Syktyvkar: Komi SC UB RAS, 1997, 198 p. (in Russian)
- Беляев В. В. Маложелезистые белоцветные бокситы: распространение, состав, промышленное использование. Сыктывкар, 2009. 44 с. (Научные достижения — практике / Коми научный центр УрО РАН; вып. 126).
Belyaev V. V. Low-iron white-colored bauxite: distribution, composition, industrial use. Syktyvkar, 2009, 44 p. (Scientific achievements for practice. Komi SC UB RAS, 126). (in Russian)
- Бушинский И. Г., Закруткин В. Е. Геохимия бокситов Южного Тимана. М.: Наука, 1978. 123 с.
Bushinskij I. G., Zakrutkin V. E. Geochemistry of South Timan bauxites. Moscow Nauka, 1978, 123 p. (in Russian)
- Вахрушев А. В., Котова О. Б., Любинский И. Ф. Бокситы Тиманского региона: новые методы и средства комплексной переработки // Разведка и охрана недр, 2009. № 11 С. 53–57.
Vahrushev A. V., Kotova O. B., Lyubinskij I. F. Bauxite of the Timan region: new methods and means of complex processing. Exploration and protection of subsoil, 2009, 11, pp. 53–57. (in Russian)
- Георгиевский А. Ф., Бугина В. М., Туе Люсьен. Месторождения латеритных бокситов Среднего Тимана // Вестник РУДН, серия Инженерные исследования. 2011. № 1. Стр. 51–56.
Georgievskij A. F., Bugina V. M., Tupe Lucien Deposits of laterite bauxite of the Middle Timan. Vestnik PFUR, Engineering studies, 2011, No. 1, pp. 51–56. (in Russian)
- Голдин Б. А., Секушин Н. А., Рябков Ю. И. Электропроводящая керамика на основе маложелезистых бокситов Среднего Тимана. Сыктывкар: Коми науч. центр УрО РАН, 1992. 12 с. (Научные рекомендации — народному хозяйству / Коми научный центр УрО РАН; вып. 104).
Goldin B. A., Sekushin N. A., Ryabkov Yu. I. Electrically conductive ceramics based on low-iron bauxite of the Middle Timan. Syktyvkar, Komi SC UB RAS, 1992, 12. (Preprints «Scientific recommendations for economics», 104). (in Russian)
- Колокольцев В. Г., Пачуковский В. М., Плякин А. М., Беляев В. В. Палеозойские латериты на Тимане // Разведка и охрана недр. 1971. С. 18–21.
Kolokoltsev V. G., Pachukovsky V. M., Plyakin A. M., Belyaev V. V. Paleozoic laterites on the Timan. Exploration and protection of subsoil, 1971, pp. 18–21. (in Russian)
- Котова О. Б., Размыслов И. Н., Ростовец В. И., Силаев В. И. Радиационно-термическое модифицирование железистых бокситов в процессах их переработки // Обогащение руд. 2016. № 4. С. 16–22.
Kotova O. B., Razmyslov I. N., Rostovtsev V. I., Silaev V. I. Radiation-thermal modification of ferruginous bauxites during their processing. Ore processing, 2016, No. 4, pp. 16–22. (in Russian)
- Лихачев В. В. Ниобий в бокситах и корах выветривания Среднего Тимана // Геология и полезные ископаемые северо-востока европейской части СССР: Тр. Ин-та геологии Коми фил. АН СССР; вып. 27. Сыктывкар, 1978. С. 74–78.



- Likhachev V. V. Niobium in bauxites and weathering crusts of the Middle Timan. *Geology and minerals of the North-East of European part of the USSR*, Proc. Institute of geology Komi branch USSR AS, 27, Syktyvkar, 1978, pp. 74–78. (in Russian)
- Лихачев В. В., Швецова И. В. Редкометалльно-редкоземельная минерализация в девонских и бокситоносных корах выветривания на Среднем Тимане / Рудоносные формации зоны гипергенеза. Л.: Наука, 1990. С. 62–63.
- Likhachev V. V., Shvetsova I. V. Rare-metal-rare-earth mineralization in Devonian and bauxite-bearing weathering crusts in the Middle Timan. *Ore formations of hypergenesis zone*. Leningrad: Nauka, 1990, pp. 62–63. (in Russian)
- Минин А. М. Особенности минерального состава бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения (Средний Тиман) // *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана*. 2018. С. 344–348.
- Minin A. M. Features of the mineral composition of the bauxite of the Vezhayu-Vorykvinsky deposit (Middle Timan). *Geology and minerals and problems of geoeconomy of Bashkortostan*, 2018, pp. 344–348. (in Russian)
- Плякин А. М. Девонские бокситы Тимана. История открытия и изучения // *Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*, Сыктывкар, 2009. № 3. С. 8–10.
- Plyakin A. M. Timan Devonian bauxites. The history of discovery and study. *Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS*, Syktyvkar, 2009, No. 3, pp. 8–10. (in Russian)
- Плякин А. М., Лысов Ю. М., Лушков В. В. К бокситам Тимана: страницы истории изучения и освоения Тиманской бокситорудной провинции. Ухта, 2003. 324 с.
- Plyakin A. M., Lysov Yu. M., Lushkov V. V. Timan bauxites: pages of the history of the study and development of the Timan bauxite province. Ukhta, 2003, 324 p. (in Russian)
- Сапожников Д. Г. Генетическая классификация бокситовых месторождений // *Генетическая классификация и типы бокситовых месторождений СССР*. М.: Наука, 1974. С. 5–20.
- Sapozhnikov D. G. Genetic classification of bauxite deposits. *Genetic classification and types of bauxite deposits of the USSR*. Moscow: Nauka, 1974, pp. 5–20.
- Фишман М. В. Экспедиционные исследования Института геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Сыктывкар, 2000. 360 с.
- Fishman M. V. Expeditionary research of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Syktyvkar, 2000, 360 p. (in Russian)
- Чернов А. А. Геологические предпосылки развития поисковых работ в северо-восточных областях европейской части СССР // *Материалы 2-й геол. конф. Коми АССР*. Сыктывкар, 1947. С. 28.
- Chernov A. A. Geological prerequisites for the development of prospecting in the north-eastern regions of the European part of the USSR. *Proc. 2nd Geol. Conf. Komi ASSR*. Syktyvkar, 1947, 28 p. (in Russian)
- Швецова И. В. Типоморфизм акцессорных минералов в Среднетиманских бокситах и их материнских породах // *Типоморфизм и генетическая информативность минералов*. Сыктывкар, 1979. С. 86–94. (Труды Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 30).
- Shvetsova I. V. Typomorphism of accessory minerals in Middle Timan bauxites and their parent rocks. *Typomorphism and genetic information of minerals*. Syktyvkar, 1979, pp. 86–94. (Proc. Institute of geology Komi branch USSR AS, 30) (in Russian)
- Razmyslov I. N., Kotova O. B., Silaev V. I., Rostovzev V. I., Kiseleva D. V., Kondratyev V. I. Microphase Heterogenization of High-Iron Bauxite as a Result of Thermal Radiation // *J. Mining Science*, 2019. V. 55. № 5. P. 811–823.
- Udoratina O. V., Panikorovskii T. L., Chukanov N. V., Voronin M. V., Lutoev V. P., Agakhanov A. A. and Isaenko S. I. (2024) Dmitryvarlamovite, $Ti_2(Fe_3+Nb)O_8$, a new columbite-superfgroup mineral related to the wolframite group / *Mineralogical Magazine* Pp. 1–8. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.95>

Поступила в редакцию / Received 11.06.2024



2000 лет со дня рождения Плиния Старшего

Ю. Л. Войтеховский

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена,
Российское минералогическое общество, Санкт-Петербург
vojtekhovskij@herzen.spb.ru

Статья приурочена к 2000-летию со дня рождения Гая Плиния Старшего (23–79 н. э.), автора «Естественной истории», в которой два последних тома посвящены горным породам и минералам. Обращено внимание на то, что именно Плиний первый зафиксировал атрибуты многогранника (грани, ребра, вершины) на совершенных природных кристаллах. Лишь через 16 веков их измерения привели к эмпирическим законам Н. Стено (1638–1686), затем Р. Ж. Аюи (1743–1822). Переводы из «Естественной истории» даны по В. М. Севергину, описание извержения Везувия в 79 г. — из XVI письма Плиния Младшего к Тациту. Цель статьи — точная расстановка акцентов в истории минералогии и кристаллографии. Она ориентирована на историков науки, а также преподавателей, аспирантов и студентов геологических факультетов университетов. Цитирование старых и древних авторов в статье важно для доказательства главного тезиса — приоритета Плиния Старшего, а также имеет целью привлечь молодых исследователей к чтению первоисточников.

Ключевые слова: Теофраст, Тит Лукреций Кар, Плиний Старший, «Естественная история», Плиний Младший, ал-Бируни, Н. Стено, Р. Ж. Аюи, Ж. Б. Л. Роме-де-Лиль, В. М. Севергин, кристаллический многогранник, история минералогии и кристаллографии

2000 years since the birth of Pliny the Elder

Yu. L. Voytekhovsky

A. I. Herzen Russian State Pedagogical University,
Russian Mineralogical Society, Saint Petersburg

The article is timed to the 2000th anniversary of the birth of Pliny the Elder (23–79 A.D.), the author of «Natural History», in which two last volumes are devoted to rocks and minerals. Attention is drawn to the fact that he was the first to fix polyhedron attributes (faces, edges, vertices) on perfect natural crystals. It was not until 16 centuries later that their measurements led to the empirical laws of N. Steno (1638–1686) and R. J. Haüy (1743–1822). Translations from «Natural History» are given according to V. M. Severgin, descriptions of the eruption of Vesuvius in 79 are taken from the XVI letter to Tacitus by Pliny Jr. The purpose of the article is to accurately set the stage for the history of mineralogy and crystallography. It is aimed at historians of science, as well as teachers, graduate students and students of geological faculties of universities. The citation of old and ancient authors in the article is important to prove the main thesis — the priority of Pliny the Elder, and also aims to attract young researchers to read primary sources.

Keywords: Theophrastus, Titus Lucretius Carus, Pliny the Elder, «Natural History», Pliny the Junior, al-Biruni, N. Steno, R. J. Haüy, J. B. L. Romé de Lisle, V. M. Severgin, crystalline polyhedron, history of mineralogy and crystallography

Есть юбилеи, подавляющие своим величием. 2000 лет со дня рождения Гая Плиния Старшего — это уже геологический возраст! К таким образцам применим радиоуглеродный анализ, погрешность датировок — несколько лет. А тут — все точно: родился в 23 г., погиб в 79 г. История предвидела масштаб личности и согласовала ее уход с таким могучим и торжественным извержением Везувия, коего не было ни до, ни после...

Плиний Старший — автор многотомной «Естественной истории» (Historia Naturalis), изданной им всего за год до гибели. Для просвещенного римлянина бесконечно разнообразный космос — уже не хаос, и надобно понять его порядок. Энциклопедия Плиния — об этом. Нам наиболее интересны тома XXXVI «Камни, скульптуры» и XXXVII «Драгоценные камни и изделия из них». Они были со знанием дела переведены на русский язык академиком минералогии В. М. Севергиным в начале XIX века и цитируются далее. Горные породы рассмотрены Плинием Старшим как материал для

скульптур и строительства зданий, минералы — как драгоценности, сырье для изготовления украшений, красок, лекарств и прочего в технологиях того времени. И все же что-то важное практичный римлянин от мечтательных греков унаследовал, ибо заметил в минералах и несколько раз зафиксировал на пергаменте их бесполезное¹ (в сравнении с цветом, блеском, твердостью...) свойство, а именно — в самых совершенных образцах минералы суть природные многогранники.

Прежде чем обратиться к Плинию Старшему, вспомним о его далеком предшественнике Теофрасте (371–287 до н. э.). В его трактате «О камнях» находим всего одно упоминание о формах минералов: «Камень, находимый близ Милета, не горит, он угловатый, и имеются на нем шестиугольные формы. Его тоже называ-

¹ До сего дня «бесполезность» на данный момент — признак фундаментальной науки...

ют „антракс“, и это удивительно, так как он некоторым образом подобен „адамасу“» (Теофраст, 2004, с. 42–43). Выбирая между рубином, шпинелью и гранатом («антракс» — красный горячий уголь), переводчики и комментаторы остановились на последнем (Ibid., с. 97–98). «И это удивительно», так как на преобладающих у граната ромбододекаэдре и тетрагонтриоктаэдре нет шестиугольных форм, хотя изометричностью (у обоих кубическая сингония) он «подобен „адамасу“» (алмазу)².

Плиний Старший о кристаллическом многограннике

О свойствах вещи процитируем Тита Лукреция Кара (99–55 до н. э.), другого римлянина, эпикурейца, материалиста и атомиста, отвергавшего боязнь смерти, и во всем этом — несомненного предтечу Плиния Старшего. «Свойство есть то, что никак отделить иль отнять невозможно / Без разрушенья того, чему оно будет присуще: / Вес у камней, у огня теплота, у воды ее влажность...» (Лукреций, 2006, с. 41). Это же Б. Спиноза (1632–1677) позднее определит в «Этике, доказанной в геометрическом порядке» (1677) как атрибут, неотъемлемое качество, «то, что ум представляет в субстанции как составляющее ее сущность». Но нам важно именно мнение Тита Лукреция Кара, ведь его должен был знать широко эрудированный Плиний Старший при описании свойств минералов. Понятно же, что основное свойство многогранника — наличие граней, пересекающихся по ребрам, сходящимся в вершинах. Многогранник — он же многовершинник и многореберник. Даже Ж. Б. Л. Роме де Лиль (1736–1790, рис. 1) и геометры его поры сомневались, какое из свойств положить в основу системы.

И. И. Шафрановский писал об упоминании многогранников древними авторами довольно критически. «У древних авторов кристаллические формы многогранников почти не упоминаются. Даже в <...> «Естественной истории» Плиния <...> употребляются лишь лаконичные и неточные эпитеты: золото и алмаз — „четыреугольные“, горный хрусталь — „шестиугольный“» (Шафрановский, 1956, с. 213; 1978). Действи-



Рис. 1. Ж. Б. Л. Роме де Лиль (все фото в тексте — из архива Д. П. Григорьева)

Fig. 1. J. B. L. Romé de L'Isle (all photos in the text are from the D. P. Grigoriev's archive)

тельно, до различия многогранников, разрешенных и не разрешенных на кристаллах, было очень далеко. Этого еще не знал Н. Стено (1638–1686) (рис. 2), через 16 веков сформулировавший первый эмпирический закон кристаллографии «о равенстве углов между соответственными гранями на кристаллах одного сорта» (Стенон, 1957)³. Еще через сто лет уже будет знать Р. Ж. Аюи (1743–1822, рис. 3)⁴, сформулировавший второй эмпирический закон «о двойном рациональном отношении параметров» и доказавший невозможность на кристаллах платоновых икосаэдра и додекаэдра. В отношении Плиния Старшего речь идет о многогранниках как таковых, неявно определенных им через свойства (атрибуты).

² Еще раз укажем, что далее мы обосновываем приоритет Плиния Старшего в представлении природного кристалла как выпуклого многогранника. И в этом Теофраст — его единственный предтеча, которого можно процитировать. Что касается общих минералогических сведений, известны намного более древние китайские и индийские источники. Но эти знания были освоены учеными Халифата (ал-Джахиз, ал-Кинди, ибн Сина, ал-Бируни и др.) в IX–XI вв. и лишь на заре Ренессанса проникли в Европу в латинских переводах. По этим вопросам отсылаем читателя к замечательной статье-послесловию Г. Г. Леммлейна в книге (Ал-Бируни, 2011, с. 348–469).

³ На первый взгляд, мысль пропала на 16 веков и в трактате Н. Стено возродилась как очевидная. Но легче поверить, что она возникала всякий раз, когда наблюдательный искатель вертел в руках совершенный кристалл, т. е. во все века и на всех континентах, и передавалась изустно. Д. П. Григорьев явно восхищался личностью Н. Стено. Это понятно, ведь 1-й эмпирический закон установлен им на кристаллах кварца — любимого минерала Д. П. Григорьева. В архиве — десяток разных фото датчанина.

⁴ Читатель заметил, что в этом году исполнилось 385 лет со дня рождения Н. Стено и 280 лет — Р. Ж. Аюи. Почему их нет в заголовке статьи, хотя юбилеи связаны одним сюжетом? Во-первых, эти даты теряются на фоне числа 2000. Во-вторых, из студенческой поры хорошо помню, как на лекции по кристаллографии «в исторической паузе» И. И. Шафрановский нам объяснял, что римляне считали юбилеями 25, 50, 75 и 100 лет. «А их изнеженные потомки, полюбившие симпози и сатурналии, — и посмотрел на нас с укоризной, — добавили к ним все прочие даты, оканчивающиеся на 0 (круглые) и 5 (полукруглые)» ... Заметим, кстати, что написание «Аюи» отвечает фонетике французского языка, что отмечал на одной из Федоровских сессий И. И. Шафрановский. «Гаюи» — прочтение той же фамилии на немецкий манер, усвоенный первыми российскими профессорами во Фрайбергской горной академии. «Большой энциклопедический словарь» (1993 г., доступен в интернете) допускает оба написания.

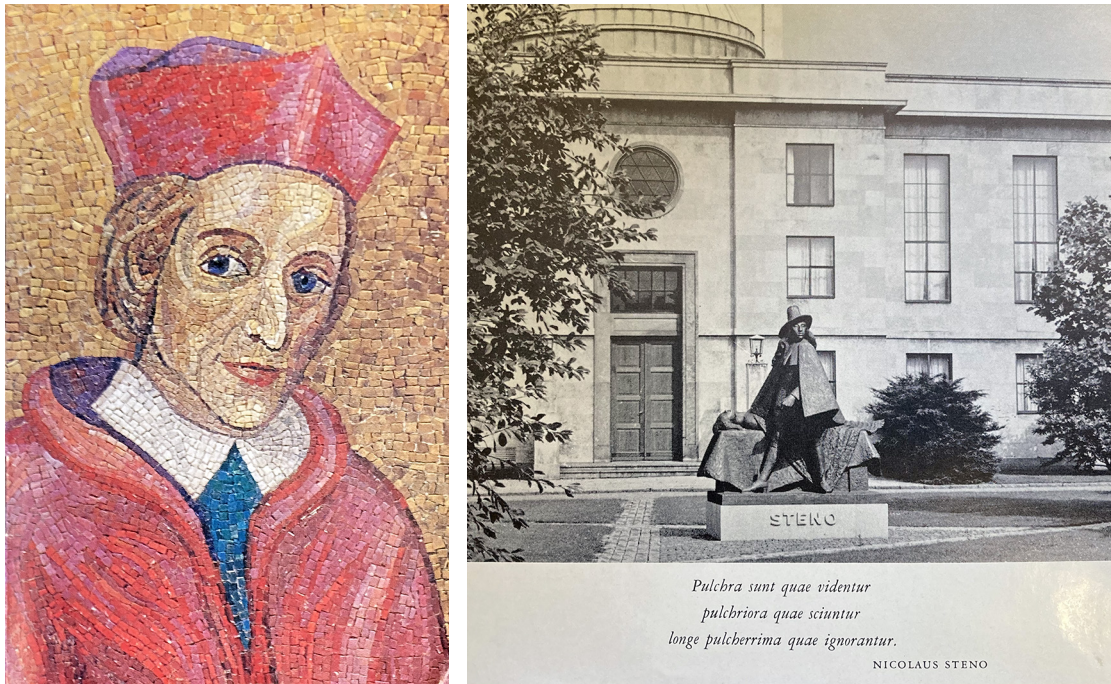


Рис. 2. Титульный цветной мозаичный портрет в больнице св. Иосифа (худ. А. Лейхбауер) и памятник Н. Стено в Копенгагене. Текст под фото: «Pulchra sunt quae videntur pulchriora quae sciuntur longe pulcherrima quae ignorantur. Nicolaus Steno» («Есть прекрасные вещи, которые мы видим, еще более прекрасные, о которых мы знаем, и самые прекрасные, которые нам неизвестны. Николай Стено» — пер. с лат. наш — Ю. В.)

Fig. 2. N. Steno. The title coloured mosaic portrait in St. Joseph's hospital in Copenhagen (by A. Leichbauer) and the monument of N. Steno in Copenhagen. Text under the photo: «Pulchra sunt quae videntur pulchriora quae sciuntur longe pulcherrima quae ignorantur. Nicolaus Steno» («There are beautiful things that we see, even more beautiful things that we know, and the most beautiful things that are unknown to us. Nicolaus Steno» — transl. from Latin by Yu. V.)

Вот его описания в переводе В. М. Севергина⁵ (рис. 4): «Алмаз. <...> При гладких своих шести⁶ сторонах [гранях], оканчивается заострением [вершиной], в двух противоположных концах как бы две кегли соединяются вместе наиболее широкими своими плоскостями» (Плиний Старший, 1819, с. 4). «Амфитан⁷. <...> Находится в той части Индии, где муравьи выкапывают золото, и где он, подобно золоту, находится четырехугольного [четырёхреберного] вида» (Ibid., с. 28–29). «Берилл. <...> Все бериллы, по домыслу художников, полируются в виде шестиугольников [шестигранников и шестиреберников]. <...> Некоторые думают, что они уже родятся угловатые [ребристые]» (Ibid., с. 68–69). «Горный хрусталь. <...> Почему он рождается шестисторонний [шестигранный], сему трудно найти причину, тем более, что и концы [вершины] не одинаковый вид имеют, и гладкость боков [граней] столь совершенна,

что того никаким искусством произвести не можно» (Ibid., с. 116–117). Здесь еще нет абстрактной мысли, нет даже эмпирического обобщения. Но в фиксации атрибутов кристаллических многогранников (граней, ребер и вершин) Плиний Старший был первым.

Даже у ал-Бируни (973–1048)⁸ через девять с половиной веков мы найдем не более того. Об алмазе: «Его природные формы до обработки представляют собой конусы, многогранники <...> из трехгранников; подобные фигуры известны под именем нарийа (огненные)⁹, в которых треугольники соединены основаниями. Среди них имеются такие, которые напоминают по виду фигуру, именуемую хава'й (воздушный)¹⁰, и называются они «ячменными» из-за острых концов и утолщенной середины (Ал-Бируни, 2011, с. 115–116). Это почти то же, что у Плиния Старшего, а «многогранники» (явное влияние современной терминологии в

⁵ В. М. Севергин (1765–1826) родился в год смерти М. В. Ломоносова (1711–1765), развил его идеи в минералогии и учении о полезных ископаемых, академик Императорской академии наук и художеств в Санкт-Петербурге (1795) и Королевской академии наук в Стокгольме (1801), автор первого российского учебника по минералогии, где предложено понятие «смежность минералов» (1798), один из основателей Российского минералогического общества (1817), член зарубежных научных обществ, преподавал в Горном училище (1798–1801), жил рядом на Большом проспекте В. О., д. 55. (1798–1826). В доме наискосок жил ученик К. Линнея, первый преподаватель минералогии, химии и металлургии со дня основания училища чл.-корр. А. М. Карамышев (1744–1791), неподалеку — академик Н. И. Кокшаров (1818–1893). В год 250-летия Горного университета было бы уместно обозначить эти места мемориальными досками.

⁶ Число 6 смущает — форма гексаэдра (куба) у алмаза редка, а 6 вершин октаэдра гладкими быть не могут.

⁷ Смысл термина утерян.

⁸ 1050 лет со дня рождения и 975 со дня смерти — солидные даты, круглая и полукруглая вместе! Но в ряде источников они даны как приблизительные.

⁹ В арабской геометрии — тетраэдр (Ал-Бируни, 2011, с. 512).

¹⁰ В арабской геометрии — октаэдр (Ibid.). Очевидна перекичка с древнегреческой философией.



Рис. 3. Редкие фото Р. Ж. Аюи

Fig. 3. Rare photos of R. J. Haüy

переводе) — это «шестисторонники» В. М. Севергина. «Те, которые упоминают при его описании о наконецниках стрел, находят, что и у алмаза имеется сходство с ними. <...> Удивительно, какие встречаются у хрустали естественные формы <...> восьмигранные и шестигранные, точно выточенные искусственно» (Ibid., с. 118). Ал-Бируни ссылается на Теофраста и никогда — на Плиния Старшего. Между тем совпадения формулировок удивляют.

Может показаться, что тексты Плиния Старшего во времена В. М. Севергина уже были пережитками. Вовсе нет. Приведем слова из первого устава Горного училища в Санкт-Петербурге¹¹. Они интересны и сами по себе. «*Минералогический класс*. Учитель сего класса обязан преподавать студентам о общих и частных правилах минералогических и о внешних признаках минералов; изъяснять физические примечания о происхождении разного рода ископаемых тел, присоединяя к тому географическое и историческое познание минералов, в рассуждении расположения оных в горах и рождения их. И для того к чтению сих уроков избирает способное, или по системе его расположенное сочинение, или какого-нибудь новейшего и яснейшего писателя книгу <...>.

Физический класс. Общие физические правила и некоторые наблюдения славных физиков суть основание хорошего воспитания. <...> И для того должно учащимся в сем классе изъяснить, что огонь, будучи главная действующая естества причина, есть стихия, а не непонятное действие движения <...> что воздух есть тело легкое, жидкое и прозрачное, могущее стесниться и расшириться <...> что ветер есть ничто иное, как встревоженный воздух <...> что вода, так же как воздух, стихия (следуя всеобщему мнению), хотя сего прозрачного вещества, не имеющего ни вкуса, ни духа, ни цвету, естественное состояние быть льдом¹² <...> что



Рис. 4. В. М. Севергин

Fig. 4. V. M. Severgin

она простирается по ватерпасу <...> и так далее изъяснить им <...> у Ньютона, Плиния, Гарта, Мушенброка, Векера и других писателей, о физике находящихся» (В память..., 1923, с. 665). Как видим, еще 250 лет назад И. Ньютон и Плиний Старший стояли рядом, о прочих мы уже не помним.

Смерть Плиния Старшего при извержении Везувия

Многие слышали, но мало кто читал, как погиб Плиний Старший. Об извержении Везувия в 79 г. нам напоминает картина К. Брюллова (рис. 5). В год столь важного юбилея не поленимся перечесть XVI письмо его племянника Плиния Младшего к Тациту.

«Просишь от меня подробного известия о смерти моего дяди, желая предать о том потомству. Благодарю тебя усердно, ибо я знаю, что он будет иметь бессмертную славу, когда дашь ему место в своих писаниях, хотя и скончался он по бедственному случаю, опустошившему прекраснейшие страны, и смерть его произошла от достопамятного приключения, которое, погубив целые города с народом, должно учинить память его вечною. Правда, много оставил он сочинений, долженствующих быть незабвенными, однако надеюсь, что слава твоих писаний много послужит к той, которой уповать он должен. Я, со своей стороны, почитаю тех счастливыми, которым боги даровали или производить дела, достойные быть преданы писанию, или писать дела, достойные чтения; а еще счастливейшими тех, коих сугубым сим даром наградили. Мой дядя

¹¹ Доклад Сената об учреждении Горного училища при Берг-коллегии «высочайше утвержден» Екатериной II 21 октября 1773 г. (Об учреждении..., 1830; В память..., с. 658–661), устав — только 28 июня 1774 г. (В память..., 1923, с. 662–667), занятия тоже начались в 1774 г. Старые тексты читать полезно, ибо некоторые формулировки поражают лаконичной мудростью.

¹² Все же Россия — северная страна, а Санкт-Петербург — ее северная столица. В Италии и Франции считали и считают, что естественное состояние воды — быть жидкой.



Рис. 5. Брюллов К. Последний день Помпеи. 1833. «Одни только слышимы были жалобы жен, вопль детей и крик мужей. Один звал своего отца, другой сына, иной жену, и друг друга узнавали только по голосу. Сей оплакивал свое несчастье, а тот бедствие своих родственников, а иные от страха смерти призывали самую смерть. Многие умоляли о помощи богов, многие думали и полагали, что сия ночь была самая последняя и вечная ночь, в которой свет долженствует остаться. Были же и такие, которые умножали правильный и справедливый страх воображаемыми и мечтательными ужасами» (Достопамятности..., 1800, с. 32–33)

Fig. 5. Bryullov K. The Last Day of Pompei. 1833. «Only the complaints of wives, the cry of children and the shouting of husbands were audible. One called for his father, another for his son, another for his wife, and they recognised each other only by their voices. One mourned for his misfortune, and the other for the misfortune of his relatives, and some called on death itself for fear of death. Many begged for help from the gods, many thought and believed that this night was the last and eternal night in which the light must remain. There were also those who multiplied the right and just fear with imaginary and dreamy terrors» (Dostopamyatnosti..., 1800, pp. 32–33)

будет занимать место между последними, по твоим и своим писаниям; сие тем паче обязывает меня исполнить твое желание, что не преминул бы я и сам тебя о том просить.

Он находился в Мисене, где начальствовал флотом. Августа 23, около часа пополудни, мать моя объявила ему, что поднимается туча необыкновенной величины и вида. Отдохнув несколько времени на солнце, по своему обыкновению, и напившись холодной воды, лег он на постель. Потом встав, взошел на такое место, откуда мог удобнее смотреть на сие чудо. Трудно было рассмотреть вдаль, с какой горы сие облако поднималось; опыт после открыл, что с горы Везувия. Вид его подобен был более сосне, нежели какому другому дереву, ибо, поднявшись чрезвычайно в высоту прямо, вершину имело кудреватую и как бы ветвистую. Думаю, подземный ветер извергал оное вверх и держал его; но или потому, что стремление ослабло, или облако сие увлеклось от собственной своей тяжести, оно распространилось и рассеялось. Оно казалось то бело, то черновато, то различного цвета, смотря по тому, чем было наполнено, пеплом или землею.

Сие чудо удивило моего дядю, и он почел его достойным того, чтоб посмотреть на него поближе. Он приказывает приготовить для себя легкий фрегат и оставляет мне на волю следовать за собою. Я отвечивал ему, что для меня приятнее заниматься науками, и по случаю сам он дал мне нечто написать. Он

уже вышел из покоя, как флотные войска, находившиеся в Ретине, уstraшены будучи великостью опасности (ибо сие местечко было точно под Мисеною, и иначе невозможно было спастись, как морем), пришли просить его о избавлении себя от столь страшной опасности. Он не переменял намерения и продолжал с героическою твердостью то, что сперва предпринял из простого любопытства. Приказав подать галеры, садится и отправляется в намерении видеть, какую помощь можно подать не только Ретине, но и всем селениям тамошней страны, находившимся в великом множестве по причине ее красоты. Он спешит туда, откуда все бежат, и где опасность только что увеличивалась, но с такою свободою духа, что по мере, как усматривал какое-либо движение или необычайный вид в севявлении, делал свои наблюдения и оные диктовал.

Уже на его суда летел самый густой и горячий пепел, по мере как они приближались; уже падали кругом их обгорелые камни и черные кремни, пережженные силою огня; уже берег казался неприступен от огромной величины камней, коими был покрыт; как подумав несколько, не зная на что решиться, сказал кормчему, советовавшему отступить в море: смелым Бог владеет, ступай к Помпониану. Помпониан находился в Штабии, в месте, отделенном небольшим заливом, который море неприметно делает у сих навесившихся берегов. Тут при виде опасности, которая была еще отдаленна, но которая непрестанно, по-



видимому, приближалась, снес он всю мебель на корабль и к отступлению своему ожидал только способного ветра. Мой дядя нашел его в крайнем смущении, объемлет его, ободряет, и дабы прогнать своим спокойствием страх его, приказал изготовить для себя баню, после которой сел за стол и ужинал с обыкновенною веселостью или, что не менее важно, со всеми знаками обыкновенной веселости.

Между тем гора Везувий во многих местах была освещается великим пламенем, который еще более умножал ужас. Мой дядя, ободряя тех, кои с ним находились, говорил, что видимый ими огонь происходит от горящих селений, оставленных устрешенными поселянами, находящимися без всякой помощи. Потом он лег и заснул глубоким сном; и как был здоров, то храпение его было слышно в передней; но наконец двор, которым был вход в его покои, начал наполняться пеплом столь много, что если б хотя еще несколько он остался, уже б было невозможно и выйти. Его разбудают, он выходит и соединяется с Помпонием и прочими, которые не спали. Они советуют и рассуждают, запереться ли в доме или удалиться, ибо дома столько колебались от частых землетрясений, что, по видимому, как бы срываемы были от своих оснований и бросаемы то в ту, то в другую сторону и потом поставляемы на свое место. Вне города надлежало страшиться падения камней, хотя, впрочем, легких и огнем раздробленных.

Между сими опасностями избрали ровное поле. В спутниках его страх вступал на место другого, а у него сильнейший разум превозмогал над слабым. Итак, выходят, обвязав голову платками: вот вся предосторожность против того, что падало сверху. Уже начинал показываться день, но в том месте, где они находились, была самая мрачная и грозная ночь, освещаемая слабо от излетающего пламени. Они приблизились к берегу, чтоб посмотреть, можно ли пуститься в море, но оно в чрезвычайном было волнении от противного ветра. Дядя мой, потребовав воды и напившись дважды, лег на разостланной епанче. Тут пламя, показавшееся сильнейшим, и серный смрад, предшествующий оному, всех обратили в бегство. Он встает, опершись о двух служителей, и тут же падает мертв. Думаю, что надмеру густой дым задушил его, тем паче, что он имел грудь слабую и часто трудное дыхание.

Когда показался свет (что последовало не прежде, как спустя три дни), найдено тело его в том же месте невинно и в той же одежде, которая на нем была до смерти, и более в положении спящего, нежели мертвого человека. В сие время мать моя и я находились в Мисене, но сие не касается до твоей повести. Ты желал быть известен только о смерти моего дяди. Итак, заканчиваю, сказав при том одно сие: что я не сказал тебе ничего такого, или чего б не видел, или о чем бы не извещился в то время, в которое истина прошедшего не могла еще перемениться. Тебе остается избирать то, что покажется важнейшим. Ибо иное есть писать письмо, иное писать Историю; писать к другу или для потомства. Прощай» (Достопамятности..., 1800, с. 14–25).

Заключение

В качестве практического вывода из предпринятого историографического исследования мы полага-

ем, что в университетских курсах кристаллографии следует непременно отмечать, пока не доказано иное: на кристаллические многогранники первым указал через их атрибуты (границы, ребра и вершины) Плиний Старший. Лишь через 16 веков начались их измерения, приведшие к первым эмпирическим законам кристаллографии и далее к построению научной теории, согласовавшей структуры и формы.

О мужестве Плиния Старшего как естествоиспытателя достаточно сказано в письме Плиния Младшего к Тациту. Фиксировать извержение Везувия с палубы корабля под падающими лапиллями и горячим пеплом — это красноречиво говорит о характере. Между тем вулканы продолжают громко заявлять о себе. В этом веке уже было более 50 извержений с индексом взрывоопасности (VEI) 4 и выше, человеческими жертвами, разрушениями и выбросами пепла, нарушившими авиасообщение¹³. Напомним об осторожности словами древнего автора.

«В некотором расстоянии от Тур-ла-Грек на пути к Портичи находится латинская надпись, неаполитанским вицерою Еммануилом Фонзекю положенная после славного извержения, последовавшего в 1631 г. Надпись положена в том самом месте, где лава остановилась. Оживленный штиль, течение слова и отборные выражения, сочинителем сей надписи употребленные к изображению сего ужасного извержения, дают понятие о страхе, каковым были поражены окрестные жители. Здесь следует ее перевод.

Потомки, потомки! Вашу пользу в виду имею. День дни отрыгает разум, и минувшее предвещает будущее. Блюдитесь, двадцать краты от начала солнца, если История не вымысел, возгорался Везувий к особенно злочастию тех, кои бегством жизнь свою спасти не ускорили... Гора сия, будучи наполнена смолою, квасцами, железом, златом, серебром, селитрою, еще приемлет море в недра свои; поздно или рано, при помощи вод, долженствует учинить извержение; но пред тем потрясается и землю потрясает; дымится, осиявается, пламенеет, в воздух молнию мечет, ревет ужасно, гремит и жителей далече прогоняет. Удаляйся, пока еще есть время! Се уже возгорается, огненные озера готовы отрыгнуться и упредить твое бегство. Если тебя постигнут, дело кончено, ты погиб! В 1631 лето по Р. Х., при царствовании Филиппа IV и в правление Еммануила Фонзека, вицероя, поправлены возможным образом минувшие бедствия. Везувий щадит тому, кто удаляется; разит того, кто его презирает, а особенно того безумца, который жизни имение предпочитает. Если ты разумен, внемли сему вопиющему камню: оставь все и немедля спасайся» (Достопамятности..., 1800, с. 142–144).

Автор благодарит рецензентов за весьма квалифицированные советы, способствовавшие лучшему изложению материала.

¹³ В 1980 г. как студент ЛГИ автор проходил практику на Камчатке в Институте вулканологии ДВО АН СССР, работал в кальдере Ксудача и имел радость спускаться в кратер Авачи (кстати, он относится к типу Везувия, но наши вулканологи справедливо считают, что это Везувий относится к типу Авачи), а в 1991 г. он заполнился лавой до краев.



Литература / References

- Ал-Бируни (Абу-р-Райхан Мухаммед ибн Ахмед ал-Бируни).* Собрание сведений для познания драгоценностей. Минералогия. Изд. 2-е. СПб.: Петербургское лингвистич. об-во, 2011. 600 с.
- Al-Biruni (Abu-r-Raykhan Mukhammed ibn Akhmed al-Biruni). Collection of information for the knowledge of jewellery. Mineralogy. 2nd Ed., St. Petersburg: Petersburg Linguistic Soc., 2011, 600 p. (in Russian)
- В память 150-летнего юбилея Горного института в Петрограде // Горный журнал.* 1923. № 11. С. 651–764.
- In memory of the 150th anniversary of the Mining Institute in Petrograd. Mining J., 1923, No. 11, pp. 651–764. (in Russian)
- Достопамятности Везувия и Этны или краткое начертание знаменитейших извержений сих огнедышащих жерл от эпохи первого действия по нынешнее время известных.* Пер. с ит. М. Ястребцова. М.: Губ. тип. А. Решетникова, 1800. 144 с.
- Sights of Vesuvius and Etna or a brief outline of the most famous eruptions of these fire-breathing vents, known from the epoch of the first action to the present time. Transl. from Italian by M. Yastrebtsov. Moscow: A. Reshetnikov's Print., 1800, 144 p. (in Russian)
- Лукреций (Тит Лукреций Кар).* О природе вещей. М.: Мир книги, 2006. 336 с.
- Lucretius (Titus Lucretius Carus). Nature of Things. Moscow: The World of Books, 2006, 336 p. (in Russian)
- Об учреждении Горного училища при Берг-коллегии // Полное собрание законов Российской империи с 1649 г. Т. 19. 1770–1774. СПб.: Тип. 2-го отд. собств. Е. И. В. канц., 1830. С. 837–843.*
- On the establishment of the Mining School at the Berg Collegium. Complete Collection of Laws of the Russian Empire since 1649, V. 19, 1770–1774. St. Petersburg: Typ. of the 2nd Dpt of Her Imperial Majesty's Own Chancellery, 1830, pp. 837–843. (in Russian)
- Плиний Старший.* Кая Плиния Секунда естественная история ископаемых тел, преложенная на российский язык в азбучном порядке и примечаниями дополненная трудами В. Севергина. СПб.: Имп. Акад. наук, 1819. 364 с.
- Pliny the Elder. Natural history of fossil bodies of Caius Plinius Secundus, put into Russian in the alphabetical order, and with notes supplemented by the works of V. Severgin. St. Petersburg: Imp. Acad. Sci., 1819, 364 p. (in Russian)
- Стенон Н.* О твёрдом, естественно содержащемся в твёрдом. М.: Изд. АН СССР, 1957. 151 с.
- Stenon N. On the solid naturally contained in the solid. Moscow: Acad. Sci. USSR, 1957, 151 p. (in Russian)
- Теофраст.* О камнях. М.: Изд. дом МСП, 2004. 256 с.
- Theophrastus. On stones. Moscow: MSP, 2004, 256 p. (in Russian)
- Шафрановский И. И.* История учения о формах кристаллических многогранников // Кристаллография. М.: Металлургиздат, 1956. С. 213–247.
- Shafranovsky I. I. History of the doctrine of the forms of crystalline polyhedra. Crystallography. Moscow: Metallurgizdat, 1956, pp. 213–247. (in Russian)
- Шафрановский И. И.* История кристаллографии с древнейших времен до начала XIX столетия. Л.: Наука, 1978. 296 с.
- Shafranovsky I. I. History of crystallography from the most ancient times to the beginning of the 19th century. Leningrad: Nauka, 1978, 296 p. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 16.11.2023



Хроника, события, факты. История науки • Chronicle, events, facts. History of Science

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина
Федерального исследовательского центра
«Коми научный центр Уральского отделения
Российской академии наук»

Совет молодых ученых Института геологии
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Российское минералогическое общество

26–28 ноября 2024 года

в г. Сыктывкаре состоится

33-я Всероссийская научная конференция



Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation

Institute of Geology named after Academician
N. P. Yushkin of the Federal Research Center
«Komi Scientific Center of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences»

Council of Young Scientists of the Institute
of Geology FRC Komi SC UB RAS
Russian Mineralogical Society

The 33rd All-Russian Scientific Conference
will take place on

November 26–28, 2024, in Syktyvkar

«Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента»

К участию в научной конференции приглашаются аспиранты, молодые учёные, сотрудники производственных организаций геологического профиля, студенты вузов России и других стран мира. Мы будем рады видеть также молодых ученых химиков, физиков, биологов, чьи научные интересы так или иначе связаны с природными и синтетическими материалами, минеральным и органическим сырьем. Возраст участника на момент проведения мероприятия не должен превышать 35 лет. В работе конференции предполагается проведение лекций и обучающих геологических практикумов.

Организационный комитет:

Перовский Игорь Андреевич — к. г.-м. н., председатель; Вовчина Татьяна Анатольевна — к. г.-м. н., заместитель председателя; Инкина Наталья Сергеевна — м. н. с., секретарь

Эл. почта: juventus-geo@yandex.ru

Контрольные сроки:

Окончание приема материалов — 21 октября 2024 г. включительно

Рассылка программы — 10 ноября

Заезд и регистрация участников — 25 ноября

Открытие конференции — 26 ноября

Адрес: Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54

Контакты:

Тел. (8212) 24-53-53; Факс: (8212) 24-09-70

Подробная информация: <https://geo.komisc.ru>

«Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment»

Postgraduate students, students, young researchers, employees of geological industrial organizations, students of universities in Russia and other countries are invited to participate in the scientific conference. We will also be glad to see young chemists, physicists, biologists, who are interested in natural and synthetic materials, mineral and organic raw materials. The age of the participant at the time of the event should not exceed 35 years. The conference will include talks and geological workshops.

Organizing Committee:

Perovsky Igor Andreevich — Cand.Sc. (Geology and Mineralogy), Chairman

Vovchina Tatyana Anatolyevna — Cand.Sc. (Geology and Mineralogy), Deputy Chairman

Inkina Natalya Sergeevna — Junior Researcher, Secretary

E-mail: juventus-geo@yandex.ru

Deadlines:

Submission of materials — October 21, 2024 inclusive

Program distribution — November 10

Arrival and registration of participants — November 25

Conference opening — November 26

Address:

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS
54 Pervomayskaya st., Syktyvkar,
167982, Komi Republic

Contacts:

Tel. +7 (8212) 24-53-53; Fax: +7 (8212) 24-09-70

Detailed information: <https://geo.komisc.ru>

Редакторы издательства:

Г. Н. Каблис, О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка:

Р. А. Шуктомов

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 30.08.2024. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 5. Тираж 140. Заказ 1232. 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. Перетягина, Р. Шайбекова, С. Исаенко, Н. Уляшевой, Ю. Голубевой.