



Вестник

Сентябрь, 2019 г., № 9 (297)



Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН

Научно-информационное издание, основанное академиком Н. П. Юшкиным в 1995 г.
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ журнала (2018) – 0,350

Содержание

Научные статьи

- Факторы, влияющие на динамику содержания CO_2 в пределах подземного пространства (на примере Кунгурской ледяной пещеры)
А. В. Красиков, А. С. Казанцева 3
- Геохимия органического вещества доманиковых отложений разреза р. Пымвашор, гряда Чернышева (Тимано-Печорский бассейн)
И. С. Котик, О. В. Валяева, Д. А. Бушнев, А. В. Журавлев 10
- Новые находки редких сульфидов Ni, Zn, Cr, Cu и V в карбонатитах Южного Урала
В. Г. Кориневский, В. А. Котляров, С. В. Колисниченко 17
- Гранитоиды няртинского блока (Приполярный Урал): новые данные
О. В. Удортатина, М. А. Кобл, А. С. Шуйский, В. А. Капитанова 23
- Нефтегазовый потенциал нижнекаменноугольных отложений севера Предуралья
Н. Н. Рябинкина, С. В. Рябинкин 33
- Из опыта преподавания.
II. Основная теорема кристаллографии
Ю. Л. Войтеховский 38

Хроника, события, факты

- Прикладная минералогия: из Белгорода в Авейро (14-й Международный конгресс по прикладной минералогии, Белгород, 23–27 сентября 2019 г.) 43
- Микросейсмическая вахта (60-летнему юбилею к. г.-м. н. В. А. Лютовой) 55
- На страже стратиграфических границ (К 50-летию юбилею работы д. г.-м. н. Т. М. Безносковой) ... 56

Главный редактор А. М. Асхабов, зам. главного редактора О. Б. Котова,
ответственный секретарь Т. М. Безнослова, тех. редактор Г. Н. Каблис, зав. редакцией Т. А. Некучаева

Редакционный совет — 2019:

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



September, No. 9 (297), 2019

Vestnik



Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS

Scientific information edition founded by Academician N. P. Yushkin in 1995

Five-year RSCI impact factor (2018) – 0.350

Content

Scientific articles

- | | |
|--|--|
| Factors influencing dynamics of CO ₂ content within the underground space (the case of Kungur Ice Cave)
<i>A. V. Krasikov, A. S. Kazantseva</i> | Granitoids of the Nyarta block (Subpolar Urals): new data
<i>O. V. Udoratina, M. A. Coble, A. S. Shuyskiy, V. A. Kapitanova</i> |
| 3 | 23 |
| Organic matter geochemistry of the Domanik section along the Pymvashor river, Chernyshev swell (Timan-Pechora basin)
<i>I. S. Kotik, O. V. Valyaeva, D. A. Bushnev, A. V. Zhuravlev</i> | Oil and gas potential of Lower Carboniferous deposits of the north of the Preural Foredeep
<i>N. N. Ryabinkina, S. V. Ryabinkin</i> |
| 10 | 33 |
| New findings of rare Ni, Zn, Cr, Cu and V sulphides in carbonatites of South Urals
<i>V. G. Korinevsky, V. A. Kotlyarov, S. V. Kolisnichenko</i> | From teaching experience. II.
Main theorem of crystallography
<i>Yu. L. Voytekhovsky</i> |
| 17 | 38 |

Chronicle, events, facts

- | | |
|---|--|
| Applied mineralogy: from Belgorod to Aveiro
(14th International Congress on Applied Mineralogy, Belgorod, September 23–27, 2019) | Microseismic duty |
| 43 | 55 |
| | On guard of stratigraphic boundary |
| | 56 |

Chief Editor A. M. Askhabov, **Deputy Chief Editor** O. B. Kotova,
Executive Editor T. M. Beznosova, **Technical Editor** G. N. Kablis, **Managing Editor** T. A. Nekuchaeva

2019 Editorial Board:

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



ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДИНАМИКУ СОДЕРЖАНИЯ CO₂ В ПРЕДЕЛАХ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА (НА ПРИМЕРЕ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ)

А. В. Краси́ков, А. С. Казанцева

Горный институт УрО РАН, Пермь; Alexeykrasikov55@gmail.com

Мониторинговые наблюдения за изменением концентрации углекислого газа в Кунгурской ледяной пещере проводились в период с сентября 2017 г. по февраль 2019 г. Углекислый газ является важным компонентом исследования газового состава пещеры, поскольку его повышенные значения могут оказаться опасными для человека. Постоянный контроль позволяет избежать негативных последствий и предпринять меры для их предотвращения.

Настоящая работа представляет обобщенный анализ показателей, влияющих на концентрацию углекислого газа в подземном пространстве. В ходе исследований выделены основные (температурный режим на поверхности и в пещере) и второстепенные (давление в пещере, трещиноватость, минерализация воды) факторы, влияющие на динамику содержания углекислого газа в гротах. Проведена корреляционная оценка между вариациями CO₂, микроклиматическими параметрами (температура на поверхности и в пещере, давление в пещере) и минерализацией воды озер. В зимний и летний периоды 2019 г. в разных микроклиматических зонах пещеры выполнены разовые замеры скоростей воздушных потоков, рассчитаны коэффициенты трещиноватости массива Ледяной горы в пределах развития пещеры и расходы воздуха для установления связи между концентрацией углекислоты, расходом воздуха и трещиноватостью массива.

Ключевые слова: Кунгурская Ледяная пещера, углекислый газ, температура воздуха, динамика CO₂, трещиноватость горных пород.

FACTORS INFLUENCING DYNAMICS OF CO₂ CONTENT WITHIN THE UNDERGROUND SPACE (THE CASE OF KUNGUR ICE CAVE)

A. V. Krasikov, A. S. Kazantseva

Mining institute UB RAS, Perm; Alexeykrasikov55@gmail.com

Monitoring of changes in carbon dioxide concentration in the Kungur Ice cave was conducted from September 2017 to February 2019. Carbon dioxide was an important component of the gas composition of the cave, since its elevated values during excursion activities could be dangerous to human life. Constant monitoring allows to avoid negative consequences and take measures to prevent them.

This paper presented a generalized analysis of factors that affect the concentration of carbon dioxide in the underground space. In the course of the research, the main (temperature conditions on the surface and in the cave) and secondary (pressure in the cave, fracturing, mineralization of water) factors influencing the dynamics of carbon dioxide content in the grottoes were identified. A correlation estimate was made between CO₂ variations, microclimatic parameters (surface and cave temperatures, pressure in the cave) and lake water mineralization. In winter and summer periods of 2019, one-time measurements of air flow velocities were carried out in different microclimatic zones of the cave, fracture coefficients of the massif of Ledyanaya gora within the development of the cave and air flow were calculated to establish a relationship between carbon dioxide concentration, air flow and mass fracture.

Keywords: Kungur Ice Cave, carbon dioxide, air temperature, CO₂ dynamics, fracturing of rocks.

Введение

Известно, что содержание углекислого газа в подземном пространстве на порядок отличается от его содержания в атмосфере (от 250 до 400 ppm). Например, содержание CO₂ в пещере Шульган-Таш — до 400 ppm [7], в Новоафонской пещере — от 200 до 5000 ppm [8], в пещере Золушка колеблется от 100 до 50000 ppm [1].

Ранее изучением газового состава воздуха в Кунгурской ледяной пещере занимались В. Н. Дублянский (1980-е гг.), Н. Л. Яблокова, А. Б. Климчук (1987, 1991) [5]. По результатам их работ можно сделать вывод, что изучение газового состава воздуха, особенно содержание и динамика углекислого газа, позволит определить условия и особенности происхождения и развитие многих процессов (например, гидрогеохимических), происходящих в карстовых полостях.

Наблюдения за содержанием углекислого газа в Кунгурской ледяной пещере необходимы, поскольку она является объектом массового туризма и повышенные концентрации CO₂ (> 5000 ppm) могут представ-

лять опасность для жизни. С каждым годом количество посетителей увеличивается (например, в 2017 г. пещеру посетило 105 тыс. чел, в 2018 — 129 тыс. чел.) и повышается количество выдыхаемой углекислоты. Вопрос о влиянии количества посетителей на изменение концентрации CO₂ в пещере рассмотрен в предыдущей работе [4]. Максимальные концентрации CO₂ в пещере (до 1500 ppm) возникают в летний период (июль) после посещения около 2 тыс. человек за сутки. Углекислый газ тяжелее атмосферного воздуха, при дыхании он концентрируется сначала в верхних слоях воздуха грота, путем диффузии постепенно опускается и накапливается в нижней части грота. Такое движение характерно для всех гротов пещеры.

Пещера представляет собой сложную систему гротов и соединяющих их более узких проходов с несколькими входами на разных высотных уровнях. Движение воздуха происходит под влиянием естественной тяги, за счет разностей плотностей наружного и пещерного воздуха. На основе существующего регламента проветривания [2] сотрудниками ста-

ционара проводится регулирование естественного воздушного потока в пещере и используются 2 режима проветривания из 4 возможных. В летнее время в пещере используется режим проветривания, при котором во входном и выходном тоннелях шлюзовые двери закрыты. В зимнее время используется режим проветривания, когда двери входного шлюза открыты, а двери выходной шлюзовой части закрыты. Интенсивность воздуха, по данным воздушно-депрессионной съемки, зависит от разницы температур на поверхности и внутри пещеры, давления в гротах, от размеров галерей и структурно-текстурных особенностей массива, в котором заложены гроты пещеры (трещиноватость) [3]. Для Кунгурской ледяной пещеры характерно образование на поверхности озер кальцитовых пленки. Средняя минерализация воды составляет 2,2 г/дм³. Состав воды сульфатно-кальциевый. В летний период при испарении воды из озер увеличивается общая минерализация воды, а на поверхности озер растет концентрация растворенного CaCO₃. Формированию кальцитовых пленок способствует выделение углекислоты из воды.

Цель работы заключалась в анализе природных факторов, влияющих на динамику изменения концентрации углекислого газа в пределах подземного пространства Кунгурской ледяной пещеры.

Методика работ

Для исследования изменения содержания CO₂ был установлен датчик CORA (U-Logger CO₂ 12/2011 SNr: 35; Austria) с интервалом измерений 60 мин. На сегодняшний день устройство контроля CORA — один из самых точных приборов (± 50 ppm, погрешность в пределах 3 %), который был специально разработан для мониторинга двуокиси углерода в условиях пещеры [10]. Интервал измерения 60 мин. (один замер) позволяет вести непрерывные замеры CO₂ в течение месяца. Увеличение количества измерений до четырех замеров в час сокращает работу прибора до одной-двух недель.

С сентября 2017 г. по февраль 2019 г. датчик для измерения концентраций углекислого газа был установлен в гроте Дружбы Народов в 700 м от входовой части (зона постоянных положительных температур). Выбор места установки прибора связан с тем, что грот Дружбы Народов расположен в центральной части пещеры в зоне постоянных положительных температур и её изменения от среднего значения минимально. На фоне этого фактора возможно оценить влияние других параметров, которые влияют на динамику углекислоты не так значимо. Озеро, расположенное в гроте, также дает нам возможность оценить влияние минерализации озерной воды на содержание CO₂. В периоды паводка и межени в 2017–2018 гг. был выполнен отбор проб воды из озера в гроте Дружбы Народов.

В 2019 году были проведены измерения концентраций углекислоты в зимний и летний периоды в разных микроклиматических зонах. Замеры были выполнены в 12 гротах с интервалом 15 мин в течение 6 часов. Данные исследования позволили проследить изменение концентрации CO₂ в точках замера при смене температурного режима и режима проветривания в пещере.

Во время наблюдений фиксировались основные метеопараметры: температура на поверхности, температура и давление в пещере. Данные о температуре воздуха на поверхности были получены с помощью метеостанции Meteoscan pro 923 (Termometerfabriken Viking AB, Швеция), установленной на базе Кунгурской лаборатории-стационара. Температура в гротах пещеры измерялась ртутными термометрами и автоматическими датчиками НОВО Water Temp Pro v2 (Onset Computer Corporation, США).

Оценка связи между трещиноватостью массива горных пород и концентрацией углекислого газа проводилась с использованием двух расчетных коэффициентов трещиноватости (площадной удельной трещиноватости и объемного коэффициента трещиноватости). Первый коэффициент представляет собой отношение общей длины трещин (м) к площади изучаемого участка (грот, м²). Второй — отношение количества всех трещин грота (шт.) к его объему (м³). Для структурного картирования были использованы тахеометры Leica TCR800 и Sokkia CX 106. Трещиноватость массива оценивалась для каждой точки замера путем картирования и подсчета количества трещин на всей площади грота и вычисления их общей протяженности в этом гроте. Полученные данные были обработаны и преобразованы в графический вид с помощью системы автоматического проектирования и черчения AutoCAD.

Фиксировались трещины, которые хорошо выражены в массиве горных пород, протяженностью от 0.15 до нескольких десятков метров.

По результатам воздушно-депрессионной съемки проводился анализ зависимости концентрации углекислого газа от расхода воздушного потока [2]. Для расчета распределения воздуха и определения скорости воздушного потока использовались анемометры АПР-2 и Testo 417. Расход рассчитывался путем замера скорости воздушного потока, проходящего через сечение за одну минуту, в котором производился замер содержания CO₂.

Взаимосвязь между содержанием углекислого газа и выделенными факторами (температура на поверхности и в пещере, давление в пещере, минерализация воды озер) оценивалась путем расчета коэффициента корреляции Пирсона (r). Корреляция определяется как очень сильная при $r > 0.8$, сильная при $r = 0.6–0.8$, умеренная при $r = 0.4–0.6$, слабая и очень слабая при $r < 0.4$ [9]. Для оценки значимости корреляции рассчитанные значения r сравнивались с критическими значениями, соответствующими уровню значимости $\alpha = 0.05$ при числе степеней свободы $df = n - 2$. Чем сильнее корреляционная зависимость между фактором и CO₂, тем выше его значимость. По данному параметру были выделены основные и второстепенные факторы, влияющие на динамику содержания CO₂ в пещере.

Результаты и обсуждение

Концентрация углекислого газа в гроте Дружбы Народов за полуторогодовой период изменялась от 255 до 1367 ppm. Максимальные значения CO₂ в пещере (>1000 ppm) характерны для летне-осеннего периода (июль — сентябрь), минимальные значения — для зим-

Таблица 1. Минимальное и максимальное содержание CO₂ в гроте Дружбы НародовTable 1. The minimum and maximum CO₂ content in the Druzhby Narodov grotto

Период / Period	Концентрация CO ₂ , ppm / CO ₂ concentration, ppm	
	min	max
Зимний / Winter	255	592
Весенний / Spring	266	796
Летний / Summer	511	1269
Осенний / Fall	271	1367

Таблица 2. Корреляция между содержанием углекислого газа (CO₂) и температурой (T)Table 2. Correlation between carbon dioxide (CO₂) content and temperature (T)

	CO ₂ -T _{пещеры} (cave)	Корреляция Correlation	CO ₂ -T _{поверхности} (surface)	Корреляция Correlation
n =	394		394	
r _{crit} =	0.105		0.105	
r =	0.627	Значимая / Valuable	0.723	Значимая / Valuable
R ² =	0.39		0.52	

Примечания: n — количество измерений, r_{crit} — критическое значения коэффициента корреляции Пирсона, R² — коэффициент детерминации.

Notes: n — number of measurements, r_{crit} — critical value of the Pearson correlation coefficient, R² — coefficient of determination.

него периода (300 ppm; табл. 1). Динамика изменения концентраций углекислоты соответствует ходу изменения температуры как на поверхности, так и в пещере (рис. 1). Отмечается сильная корреляция количества углекислого газа как с температурой на поверхности ($r = 0.7$), так и с температурой в гроте Дружбы Народов ($r = 0.6$; табл. 2). Между изменением давления воздуха в гроте и CO₂ зависимости не выявлено ($r = -0.2$), хотя по графику видно, что в периоды пиковых значений давления воздуха количество углекислоты в течение двух-трех дней уменьшалось. В январе 2018 г. при максимальном значении давления (1021 mBar) концентрация углекислого газа составила 255 ppm, при минимальном значении давления (994 mBar) — 1337 ppm.

Результаты химического анализа озерной воды в гроте Дружбы Народов показали, что максимальное количество кальцита (CaCO₃) формируется в летне-осенний период (рис. 2), когда значения минерализации воды (2.1–2.2 г/дм³) и концентраций CO₂ (1300–1350 ppm) достигают своего максимума, что подтверждается предыдущими исследованиями [6]. Корреляционная зависимость между общей минерализацией воды, а также концентрацией ионов Ca²⁺ и HCO₃⁻, содержащихся в озере грота, и концентрацией углекислого газа, содержащегося в подземной атмосфере, очень слабая ($r = 0.21$ при $R^2 = 0.05$) и статистически незначимая при $r_{crit} = 0.63$. При увеличении концентрации этих ионов происходит постепен-

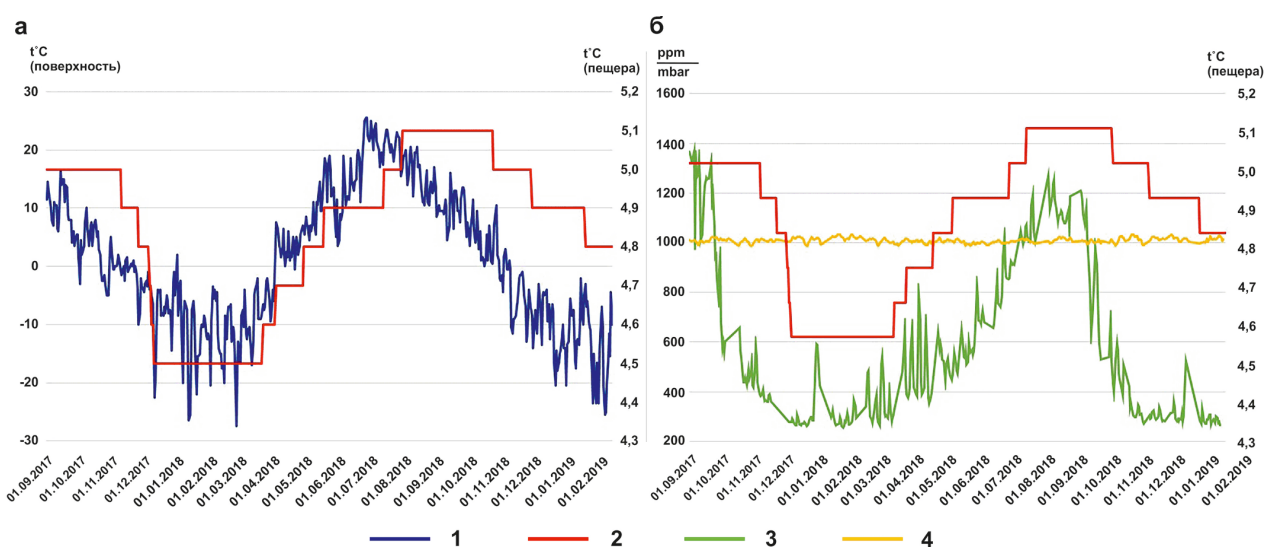


Рис. 1. Изменение концентрации углекислого газа (ppm) в гроте Дружбы Народов с сентября 2017 г. по февраль 2019 г.: а — ход температуры в гроте и на поверхности; б — изменение температуры, давления в гроте и концентрации углекислого газа: 1 — температура на поверхности; 2 — температура в гроте; 3 — концентрация углекислого газа; 4 — давление в гроте

Fig. 1. The change in carbon dioxide concentration (ppm) in the Druzhby Narodov grotto from September 2017 to February 2019: а — the temperature course in the grotto and on the surface; б — change in temperature, pressure in the grotto and the concentration of carbon dioxide: 1 — surface temperature; 2 — temperature in the grotto; 3 — carbon dioxide concentration; 4 — pressure in the grotto

ное увеличение уровня CO_2 , тогда как с падением этих значений — уменьшение.

Результаты анализа концентраций углекислого газа в зимний и летний периоды в разных микроклиматических зонах (рис. 3, 4) позволили сделать выводы, что в зимнее время от зоны отрицательных температур

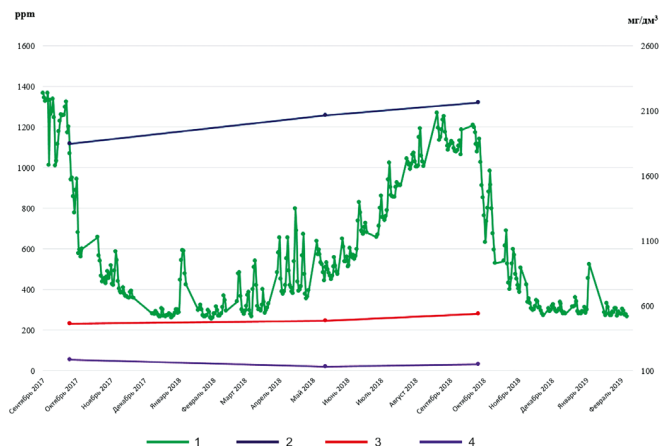


Рис. 2. Изменение концентрации углекислого газа (ppm) в гроте Дружбы Народов в период с 2017 по 2018 гг.: 1 — уровень CO_2 в гроте; 2 — общая минерализация, мг/дм³; 3 — концентрация Ca^{2+} , мг/дм³; 4 — концентрация HCO_3^- , мг/дм³

Fig. 2. The change in carbon dioxide concentration (ppm) in the Druzhby Narodov grotto in the period from 2017 to 2018: 1 — the level of CO_2 in the grotto; 2 — total mineralization, mg/dm³; 3 — concentration of Ca^{2+} , mg/dm³; 4 — concentration of HCO_3^- , mg/dm³

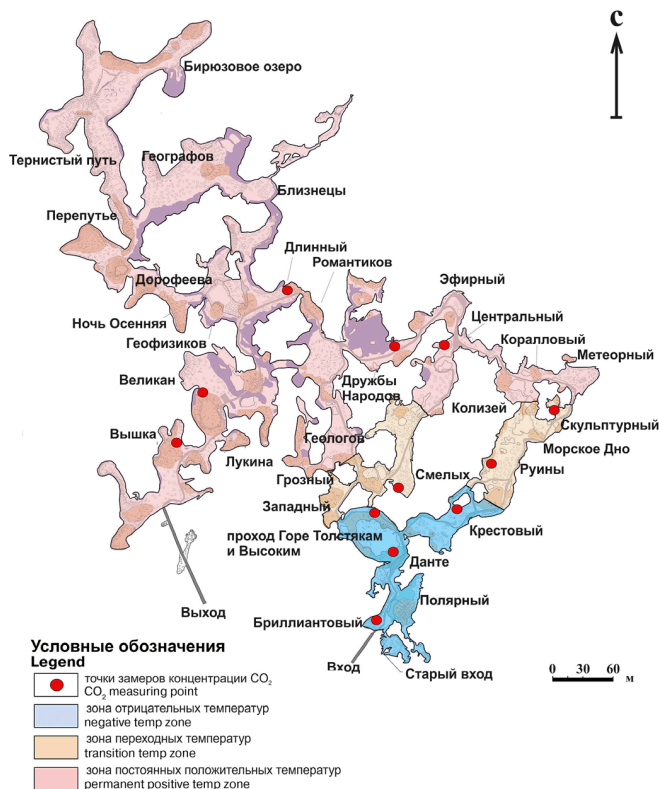


Рис. 3. Точки замеров концентраций углекислого газа в Кунгурской ледяной пещере

Fig. 3. Measurement points for carbon dioxide concentrations in the Kungur Ice Cave

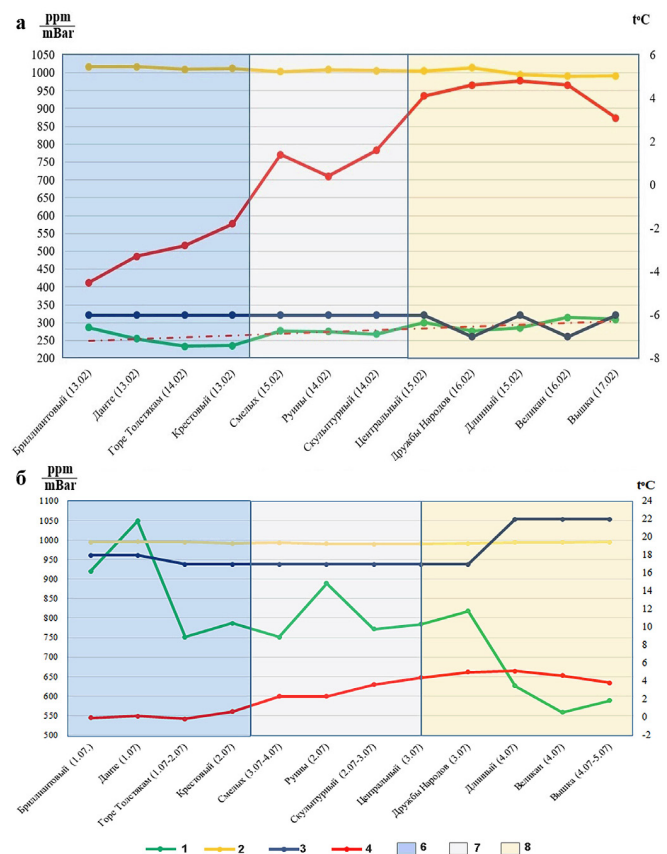


Рис. 4. Изменение концентрации углекислого газа в разных температурных зонах в зимний (а) и летний (б) периоды: 1 — концентрация CO_2 в гроте; 2 — давление в гроте; 3 — температура замера на поверхности; 4 — температура в гроте; 5 — линия тренда содержания CO_2 ; 6 — зона отрицательных температур; 7 — зона переходных температур; 8 — зона постоянных положительных температур

Fig. 4. Change of carbon dioxide concentration in different temperature zones in winter (a) and summer (b) seasons: 1 — CO_2 concentration in the grotto; 2 — pressure in the grotto; 3 — temperature measurement on the surface; 4 — temperature in the grotto; 5 — trend line of CO_2 content; 6 — zone of negative temperatures; 7 — transitional temperature zone; 8 — zone of constant positive temperatures

к зоне постоянных положительных температур происходит увеличение содержания CO_2 (от 234 до 309 ppm), в летнее время — уменьшение (от 1049 до 558 ppm). Различные значения углекислоты в подземной атмосфере гротов указывают на ее неравномерное распределение по всему объему карстовой полости.

В зоне отрицательных температур в холодный период при движении от входа (грот Бриллиантовый) в глубь пещеры (грот Крестовый) по мере увеличения температуры снижается концентрация углекислоты с 286 до 235 ppm (рис. 4, а). Минимальное значение CO_2 в этой зоне зафиксировано в проходе Горе Толстякам и Высоким (234 ppm), максимальное — в гроте Бриллиантовом (286 ppm). В теплый период от грота Бриллиантового к гроту Крестовому и проходу Горе Толстякам и Высоким количество CO_2 изменяется от 920 до 787 ppm (рис. 4, б). Минимальная концентрация CO_2 также зафиксирована в проходе Горе Толстякам и Высоким (751 ppm), максимальная — в гроте Данте (1049 ppm).



В зоне переходных температур зимой и летом наблюдается незначительное снижение CO_2 от грота Руины (275 ppm/890 ppm) до грота Скульптурного (268 ppm/772 ppm) при повышении температуры на 1.2–1.3 °C и далее увеличивается при движении к Центральному гроту (300 ppm/784 ppm). Концентрация углекислого газа повышается от грота Смелых к гроту Центральному как в зимний, так и в летний период.

В зоне положительных температур в зимний период при движении от грота Центрального (300 ppm) к выходу из пещеры (грот Вышка — 309 ppm) отмечены низкие значения CO_2 в гротах Дружбы Народов (276 ppm) и в гроте Длинном (285 ppm). В летний период максимальная концентрация углекислого газа зафиксирована в гроте Дружбы Народов (818 ppm), минимальная — в гроте Великан (558 ppm).

Такие вариации в разное время года связаны не только с температурным режимом, но и с интенсивностью воздухообмена между пещерой и поверхностью и циркуляцией воздушных масс в пещере. В зимний и летний периоды отличается направленность движения воздушного потока в разных гротах пещеры, следовательно, меняется и концентрация углекислого газа на этом участке.

В зимнее время потоки теплого воздуха поднимаются по вертикальным каналам из гротов на поверхность земли, а холодный и более плотный атмосферный воздух подсасывается в них по системам горизонтальных галерей и поступает внутрь пещеры через входной тоннель. Более мощная струя воздуха отмечается на входе в пещеру. Она формируется посредством трех основных притоков с поверхности: из входного тоннеля, Старого лаза и Телячьего хода. Этот поток движется через грот Данте до развилки на Малое и Большое кольцо, где разделяется на два потока: одна его часть продолжает движение в направлении грота Крестового до гротов Центрального — Эфирного, другая (примерно 60–70 % воздуха) — в направлении грота Западного через проход горе Толстякам и Высоким до гротов Центрального — Дружба Народов и Хлебниковых — Длинного. Со стороны грота Вышка воздушный поток устремляется в глубь пещеры до грота Длинного и Заповедной части пещеры [5]. В самом гроте 20 % воздуха просачивается через закрытые шлюзовые двери выходного тоннеля, а 80 % составляют приточки из трещин массива.

Летом воздух просачивается в пещеру с поверхности Ледяной горы и разгружается через трещины массива у его подножия, а также через входной и выходной тоннели и Старый вход. От грота Дружбы Народов воздух начинает свое движение в двух противоположных направлениях: в сторону грота Хлебниковых в направлении выходной штольни и в сторону грота Эфирного в направлении грота Центрального. В гроте Центральном поток делится, одна его часть направляется в грот Колизей, другая — в сторону грота Кораллового. Поток, движущийся к выходному тоннелю, также раздваивается: в сторону грота Геологов и в грот Длинный. Струя воздуха, проходящая через грот Геологов, соединяется с потоком, движущимся из грота Смелых, и продолжает движение в направлении грота Западного. После прохода Горе Толстякам эта струя соединяется с потоком, идущим в направлении входного тоннеля из грота Крестового [5].

Данные, полученные при проведении воздушно-депресссионной съемки, а также работы по картированию зон трещиноватости в 2018–2019 гг. позволили выявить и проанализировать зависимость уровня CO_2 от трещиноватости пород, используя коэффициенты трещиноватости и расход воздушного потока. Значения площадного коэффициента варьируют от 0.26 м/м² (грот Скульптурный) до 2.12 м/м² (проход Горе Толстякам и Высоким). Объемный коэффициент изменяется от 0.005 шт/м³ (грот Вышка) до 0.608 шт/м³ (проход Горе Толстякам и Высоким). По графику видно, что изменение коэффициентов по отношению к концентрации CO_2 практически идентично. С уменьшением значений площадного и объемного коэффициентов трещиноватости в гротах уровень углекислоты возрастает. Наибольшие значения коэффициентов трещиноватости в основном характерны для гротов, расположенных в присклоновой части массива.

Аналогичная ситуация прослеживается и с расходом воздушного потока (рис. 5). Расход воздуха минимален в гроте Смелых и составляет 25 м³/мин, что связано с разделением воздушных масс на два потока по-

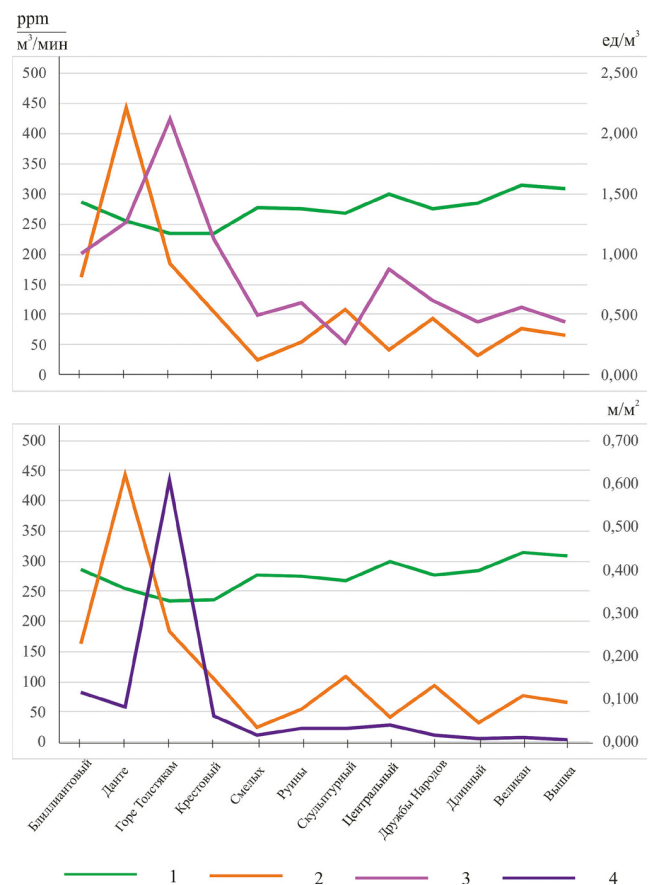


Рис. 5. Изменение концентрации углекислого газа от трещиноватости массива и скорости воздушного потока: 1 — концентрация CO_2 в гроте; 2 — скорость воздушного потока (м/с); 3 — площадной коэффициент интенсивности трещиноватости (м/м²); 4 — объемный коэффициент трещиноватости (шт/м³)

Fig. 5. Changes in carbon dioxide concentration due to massif fracture and airflow rate: 1 — CO_2 concentration in the grotto; 2 — air velocity (m/s); 3 — areal coefficient of fracture intensity (m/m²); 4 — fracture volume coefficient (pcs/m³)



сле грота Грозного. Максимальные значения расхода воздуха зафиксированы в гроте Данте — 443 м³/мин — за счет объединения потоков с входного тоннеля и старого входа и увеличения площади сечения, через который проходит масса воздуха. Поскольку замеры проводились в течение короткого периода времени, недостаточно количества данных для установления корреляционной зависимости между коэффициентами трещиноватости, расходом воздуха и концентрацией CO₂.

Выводы

Выявлены и проанализированы факторы, влияющие на концентрацию углекислоты в пещере, охарактеризована взаимосвязь изменения содержания углекислого газа от минерализации подземных вод.

Основной причиной распределения и динамики концентраций CO₂ в атмосфере пещеры является температурный режим (поверхностный и подземный), что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции ($r = 0.63–0.72$) в гроте Дружбы Народов. Хорошо прослеживается сезонность изменения углекислоты. В зимний период времени концентрация углекислого газа минимальна (300 ppm), что связано с восходящей циркуляцией воздуха. В летний период, когда воздухообмен в пещере минимален, фиксируются максимальные концентрации CO₂ (>1000 ppm). Зависимость углекислого газа, содержащегося в гроте Дружбы Народов, от минерализации воды очень слабая ($r = 0.21$) и статистически незначимая. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.05$ говорит о том, что только 0.05 % изменения концентрации CO₂ контролируется изменением минерализации. Между изменением давления в гроте и количеством CO₂ взаимосвязи не установлено ($r = -0.2$).

Анализ изменений концентраций углекислого газа в зимний и летний периоды в 12 гротах показал, что вариации содержания CO₂ зависят от микроклиматических параметров (температура в пещере), регуляции скорости движения, направления воздушных потоков и трещиноватости массива. В зимний период при движении воздушных потоков в глубь пещеры от зоны отрицательных температур к зоне постоянных положительных температур происходит увеличение содержания CO₂ (от 234 до 314 ppm). В летнее время при смене режимов проветривания и направления воздушных масс происходит снижение концентрации углекислоты (от 1049 до 558 ppm) от зоны отрицательных температур к зоне постоянных положительных температур. С увеличением трещиноватости происходит уменьшение концентрации CO₂ в гротах в результате восходящей зимней циркуляции воздуха и выноса теплого воздуха на поверхность через трещины массива.

Основным фактором изменения концентрации углекислого газа в Кунгурской ледяной пещере являются поверхностный и подземный температурный режимы. Второстепенными факторами выступают трещиноватость массива, распределение в течение года воздушного потока, который связан с изменением температуры на поверхности, и минерализация вод подземных озер.

Таким образом, комплекс полученных результатов позволяет сделать вывод, что в Кунгурской ледяной пещере концентрация углекислого газа (от 200 до 1500 ppm) не превышает допустимых значений (5000 ppm). Такие содержания углекислоты в подземной атмосфере пещеры являются наиболее безопасными для ведения экскурсионной деятельности, в отличие, например, от пещеры Золушка, где концентрация CO₂ достигает 50000 ppm. В условиях интенсивной эксплуатации в Кунгурской ледяной пещере необходим постоянный контроль за динамикой содержания углекислого газа. Мониторинговые исследования будут продолжены.

Литература

1. Андрейчук В., Телешман И., Куприч П. Пространственно-динамические особенности распределения CO₂ в воздухе пещеры Золушка // Спелеология и карстология. 2011. № 7. С. 15–25.
2. Исследования газового состава воздуха в Кунгурской ледяной пещере и разработка регламента проветривания: отчет по договору № 98/08 от 10 апреля 2008 г. / Горный институт УрО РАН; рук. Казаков Б. П., исполн. Круглов Ю. В., Кадебская О. И. М., 2009. 93 с.
3. Кадебская О. И., Южанин А. С. Исследования газового состава воздуха в Кунгурской ледяной пещере // Горное эхо: Вестник Горн. ин-та УрО РАН. 2009. № 4. С. 28–34.
4. Казанцева А. С., Красиков А. В. Сезонные вариации газового состава воздуха в Кунгурской Ледяной пещере // Горное эхо: Вестник Горного ин-та УрО РАН. 2017. № 2 (67). С. 33–37.
5. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под ред. В. Н. Дублянского. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 375 с.
6. Максимович Г. А., Панарина Г. Н. Химический состав вод подземных карстовых озер Пермской области // Пещеры. 1966. Вып. 7 (8). С. 47–53.
7. Трофимов А. А. Углекислый газ пещеры Шульган-Таш (каповой) // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5. С. 108.
8. Эмба Я. А., Дбар Р. С. Антропогенное воздействие на экосистемы карстовых пещер Абхазии при рекреационном освоении // Устойчивое развитие горных территорий. 2010. № 3 (5). С. 75–84.
9. Evans, J. D., 1996. Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences, Pacific Grove. Brooks/Cole Publishing, CA
10. Luetscher M., Ziegler F. 2012. CORA-a dedicated device for carbon dioxide monitoring in cave environments. International Journal of Speleology, 41(2), p. 273–281.

References

1. Andreichuk V. Teleshman I. Kuprich P. 2011. *Prostranstvenno-dinamicheskie osobennosti raspredeleniya CO₂ v vozduhe pescheri Zolushka* (Spatial-dynamic features of CO₂ distribution in the air of the cave Zolushka). *Speleologiya i karstologiya* (Speleology and cartography), No. 7, Simferopol, pp. 15–25.
2. *Issledovaniya gazovogo sostava vozduha v Kungurskoi Ledyanoi peschere i razrabotka reglamenta provetrivaniya* (Studies of the gas composition of air in the Kungur Ice Cave and the development of ventilation regulation). Report by agreement No. 98/08 10 April 2008. Mining Institute UB RAS, 93 p.



3. Kadebskaya O. I., Yuzhanin A. S. *Issledovaniya gazovogo sostava vozduha v Kungurskoj Ledyanoj peshchere* (Studies of the gas composition of the air in the Kungur Ice cave). *Gornoe ekho: Vestn. Gorn. in-ta*, 2017, No. 4, pp. 28—34.
4. Kazantseva A. S., Krasikov A. V. *Sezonnye variacii gazovogo sostava vozduha v Kungurskoj Ledyanoj peshchere* (Seasonal variations of the gas composition of the air in the Kungur Ice Cave). *Gornoe ekho: Vest. Gornogo in-ta*, 2017, Perm, No.2 (67), pp. 33—37.
5. *Kungurskaya Ledianaya peschera opit rejimnih nablyudenii* (Kungur Ice Cave — observations). Ed. V. N. Dublyansky, 2005, Ekaterinburg: UB RAS, 375 p.
6. Maksimovich G. A., Panarina G. N. *Himicheskij sostav vod podzemnyh karstovyh ozer Permskoj oblasti* (The chemical composition of the waters of the underground karst lakes of the Perm region), *Peshchery*, 1966, 7 (8), Perm, pp. 47—53.
7. Trofimov A. A. *Uglekislii gaz pescheri Shulgan-Tash (Kapovoi)* (Carbon dioxide of Shulgan-Tash cave (Kapova)). *Sovremennye naukoemkie tehnologii* (Modern high technologies), 2014, No.5, 108 p.
8. Ekba Ya. A., Dbar R. S. *Antropogennoe vozdeistvii na ekosistemi karstovih pescher Abkhazii pri rekreacionnom osvoenii* (Anthropogenic impact on the ecosystems of the karst caves of Abkhazia during recreational development). *Ustoichivoe razvitiie gornii territorii* (Sustainable development of mining regions), 2010, No.3 (5), pp. 75—84.
9. Evans, J. D., *Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences*, Pacific Grove. Brooks/Cole Publishing, CA, 1996.
10. Luetscher M., Ziegler F. CORA-a dedicated device for carbon dioxide monitoring in cave environments. *International Journal of Speleology*, 2012, 41(2), pp. 273—281.

ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДОМАНИКОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РАЗРЕЗА Р. ПЫМВАШОР, ГРЯДА ЧЕРНЫШЕВА (ТИМАНО-ПЕЧОРСКИЙ БАССЕЙН)

И. С. Котик, О. В. Валяева, Д. А. Бушнев, А. В. Журавлев
Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; ivkotik@gmail.com

Изучен углеводородный состав органического вещества доманиковых отложений из естественных выходов на р. Пымвашор в северной части гряды Чернышева. Показаны различия в распределении углеводородов-биомаркеров в зависимости от литологического состава пород и условий накопления органического вещества. Битумоиды известковистых аргиллитов отличаются профилем распределения *n*-алканов (максимум при *n*-C₁₃—*n*-C₁₈), повышенным отношением Pr/Ph и повышенными содержаниями гопанов. Катагенетическая преобразованность органического вещества, оцененная по данным стерановых, гопановых и ароматических углеводородов, соответствует середине главной зоны нефтегенерации ($R_o \sim 0.6$ — 0.75 %). Данный уровень катагенеза также подтверждается индексами окраски конодонтовых элементов (ИОК 2.5—3). Учитывая неоднородность распределения биомаркеров, генерированные органическим веществом доманиковых отложений нефтяные углеводороды будут обладать различными параметрами.

Ключевые слова: гряда Чернышева, органическое вещество, доманиковый горизонт, биомаркеры.

ORGANIC MATTER GEOCHEMISTRY OF THE DOMANIK SECTION ALONG THE PYMVASHOR RIVER, CHERNYSHEV SWELL (TIMAN-PECHORA BASIN)

I. S. Kotik, O. V. Valyaeva, D. A. Bushnev, A. V. Zhuravlev
Institute of Geology, Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The hydrocarbon composition of organic matter from outcrops of Domanik Formation along the Pymvashor river at the Chernyshev swell was studied. The biomarkers distribution in the samples was variable. It depended on the lithological composition of the rocks and depositional environment of organic matter. The extracted bitumens from calciferous argillite had differences in the distribution of *n*-alkanes (maximum at *n*-C₁₃—*n*-C₁₈), higher Pr/Ph ratio and higher content of hopanes. Organic matter maturity was defined based on sterane and homohopane biomarkers indicators and aromatic maturity parameters. All maturity indicators suggest that the organic matter of Domanik Formation was in the peak stage of oil generation ($R_o \sim 0.6$ — 0.75 %). This level of maturity is also confirmed by conodont Color Alteration Index (CAI) values in the range of 2.5—3. Based on the differences in the biomarkers distribution of the organic matter Domanik Formation, the oils generated by it would have different hydrocarbon features.

Keywords: Chernyshev swell, Domanik Formation, organic matter, biomarkers.

Введение

Доманиковые отложения являются одними из основных нефтематеринских толщ в Тимано-Печорском нефтегазоносном бассейне [2, 6]. Проведенное ранее изучение углеводородного (УВ) состава нефтей верхнего девона, генетически связанных с нефтематеринскими породами доманика, показало вариативность их геохимических параметров, что связывается с латеральной изменчивостью органического вещества (ОВ) и условиями его захоронения [3]. Геохимические исследования ОВ доманиковых отложений на различных участках гряды Чернышева также показали различия в распределении УВ-биомаркеров [3, 4]. Для исследуемого разреза на р. Пымвашор изучение геохимии ОВ проводится впервые, поэтому полученные новые данные позволят уточнить как латеральную изменчивость, так и специфику УВ-состава ОВ доманиковых отложений гряды Чернышева.

Район и объект исследований

Разрез исследованных доманиковых отложений расположен в северной части гряды Чернышева, где они вскрываются в естественных выходах по р. Пымвашор, левого притока р. Адзвы (рис. 1). Изученный разрез сложен преимущественно известняками, реже кремнистыми известняками и известковистыми аргиллитами. Среднефранский (домани-

ковый) возраст отложений определен по комплексу конодонтов, включающему *Mesotaxis falsiovalis* Sandberg, Ziegler, Bultynck, *Mesotaxis asymmetricus* (Bischoff et Ziegler), *Mesotaxis bogoslovskyi* Ovnatanova et Kuzmin, *Klapperina ovalis* (Ziegler et Klapper), *Palmatolepis transitans* Muller, *Palmatolepis planus* Ziegler et Sandberg, *Palmatolepis punctata* (Hinde), *Polygnathus uchtensis* Ovnatanova et Kuzmin, *Polygnathus* aff. *timanicus* Ovnatanova, *Ligonodina pectinata* Bassler u *Icriodus symmetricus* Branson et Mehl. Ранее А. И. Першиной доманиковый возраст этих отложений определялся по брахиоподам [8].

Методы исследований

Содержания органического углерода (C_{org} , %) в породе определялось на экспресс-анализаторе АН-7529 методом сжигания в токе кислорода образцов, предварительно обработанных 10 %-й соляной кислотой. Выделение битумоидов из пород проводили методом горячей экстракции хлороформом в аппарате Сокслета. Полученные экстракты хлороформенных битумоидов (ХБА, %) подвергались фракционированию с выделением насыщенных и ароматических УВ. Газохроматографический анализ УВ-состава насыщенной фракции (*n*-алканов и изопреноидов) проводился на приборе «Кристалл-2000М». Изучение молекулярного состава полициклических насыщенных

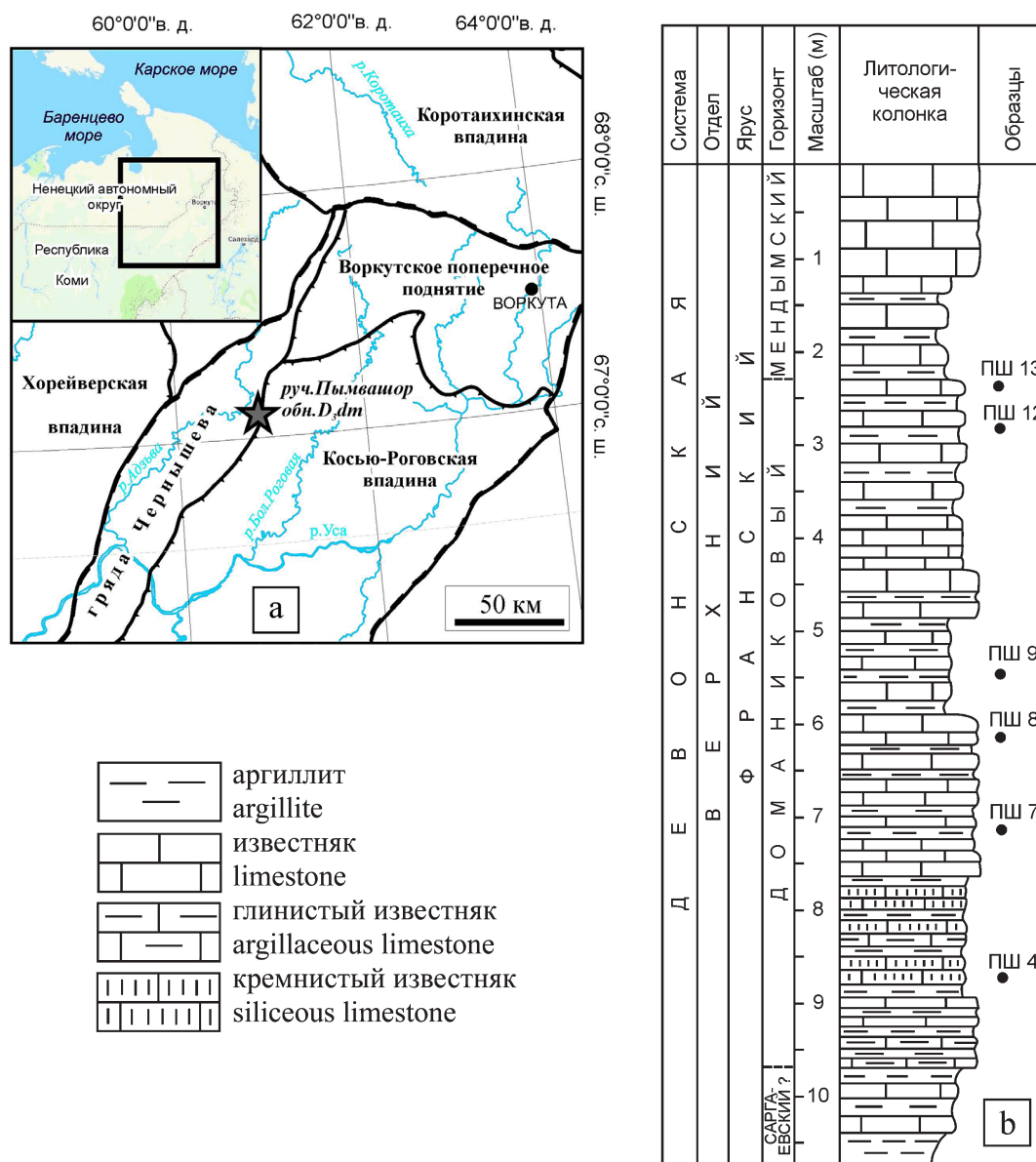


Рис. 1. Обзорная карта района исследований (а) и литологическая колонка изученного разреза (б)

Fig. 1. Schematic map of the investigated area (a) and lithological column of the studied section (b)

ных и ароматических УВ методом хромато-масс-спектрометрии выполнялось на приборе Shimadzu 2010 Ultra.

Результаты исследований и их обсуждение

Химико-битуминологическая характеристика

Содержание $C_{\text{орг}}$ в исследуемом разрезе доминанковых отложений изменяется в широких пределах — от 0.2 до 12.4 %. Концентрации ОВ меняются в зависимости от литологического состава пород. В известняках содержание $C_{\text{орг}}$ находится в пределах 0.2—1.9 %, а в известковых аргиллитах $C_{\text{орг}}$ достигает 7.7—12.4 %.

Выход ХБА изменяется с той же тенденцией. В известняках ХБА составляет 0.019—0.129 % и повышается до 0.749—0.912 % в аргиллитах. Значения битуминозного коэффициента ($\beta_{ХБ}$, %) составляют 7—11 %, что указывает на сингенетичность изученных битуминозов вмещающим отложениям.

УВ-состав битумоидов

Ациклические УВ. Н-алканы и изопреноиды

Экстрагированные из известняков и аргиллитов битумоиды отличаются по составу и распределению нормальных алканов. В битумоидах аргиллитов — мономодальное распределение *n*-алканов с максимумом в области *n*-C₁₃—C₁₈ (рис. 2, а). В области высокомолекулярных *n*-алканов наблюдаются пики полициклических УВ. В известняках наблюдается иной профиль распределения *n*-алканов. Концентрационный максимум смещен в область *n*-C₁₈ — C₂₄ и увеличен ряд диагностированных УВ с более высокими молекулярными весами до *n*-C₃₄ (рис. 2, б).

Содержание изопrenoидных алканов составляет 15—22 %. Среди них в наибольших концентрациях обычно находится пристан. По величине отношения пристана (Pr) к фитану (Ph) среди изученных образцов также устанавливаются различия. В известняках отношение Pr/Ph составляет 1.10—1.73. Для аргиллитов характерны более повышенные значения — 1.52—1.91. По соотношению нормальных и *изо*-алканов зна-



чения $Pr/n-C_{17}$ и $Ph/n-C_{18}$ для исследованных битумоидов являются схожими (см. таблицу). Исключением является образец ПШ/7, для которого эти показатели наиболее низкие — 0.45 и 0.32 соответственно, за счет повышенных концентраций УВ $n-C_{17}$ и $n-C_{18}$.

Полученные данные по распределению n - и $изо$ -алканов в изученных битумоидах характеризуют морское ОВ, источником которого являлся фитопланктон и бактерии [8].

Полициклические УВ. Стераны и терпаны

Распределение стерановых УВ сходно во всех исследованных образцах. Среди них в наибольших кон-

центрациях присутствуют холестеран (C_{27}) и этилхолестеран (C_{29}) (таблица, рис. 2). Их содержания составляют соответственно 30—34 и 49—56 %, отношение C_{29}/C_{27} меняется в пределах 1.5—1.8. Считается, что основным источником стерана C_{27} является морской фитопланктон, а C_{29} — высшие наземные растения [10, 16]. Учитывая, что осадконакопление в исследуемом районе гряды Чернышева проходило в условиях относительно глубоководной впадины на шельфе [7], вдали от источников сноса гумусового органического материала, участие такого ОВ в распределении стеранов исключается. Повышенные концентрации стерана C_{29} , вероятно, являются характерной «био-

Геохимическая характеристика исследованных образцов

Geochemical characteristic of the studied samples

Образец Sample	ПШ/4	ПШ/8	ПШ/13	ПШ/7	ПШ/9	ПШ/12
Литология Lithology	известняк кремнистый siliceous limestone	известняк limestone	известняк limestone	аргиллит известковистый calcareous argillite	аргиллит известковистый calcareous argillite	аргиллит известковистый calcareous argillite
Битуминология / Bitumology						
$C_{орг}$, % / ТОС, %	1.9	0.6	0.2	8.2	12.4	7.7
ХБА, % / СЕВ, %	0.129	0.070	0.019	0.912	0.895	0.749
β^{XB} , %	7	11	8	11	7	10
n -алканы и изопреноиды / n -alkanes and isoprenoids						
Pr/Ph	1.10	1.28	1.73	1.91	1.52	1.91
$Pr/n-C_{17}$	0.84	0.93	0.96	0.45	1.03	0.82
$Ph/n-C_{18}$	0.80	0.73	0.67	0.32	0.78	0.55
Стераны / Steranes						
$\alpha\beta\beta$ C_{27} , %	33	33	30	31	34	30
$\alpha\beta\beta$ C_{28} , %	16	17	14	17	18	15
$\alpha\beta\beta$ C_{29} , %	50	50	56	52	49	54
C_{27}/C_{29}	0.66	0.66	0.54	0.59	0.69	0.55
$C_{21}-C_{22}/C_{29}$	0.36	0.40	0.27	0.44	0.68	0.52
C_{27} диа/рег (C_{27} dia/reg)	0.6	0.4	0.7	0.3	0.3	0.4
C_{29} 20S/20S+R	0.45	0.47	0.47	0.43	0.45	0.45
C_{29} $\alpha\beta\beta/\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha$	0.55	0.56	0.57	0.52	0.53	0.53
Терпаны / Terpanes						
C_{24}/C_{23}	0.70	0.72	0.59	0.85	0.94	0.68
$C_{30}/C_{31}-C_{35}$	0.76	0.68	0.65	0.85	0.91	0.99
$C_{35}S/C_{34}S$	0.63	0.83	0.81	0.73	0.71	0.79
C_{32} 22S/22S+R	0.62	0.59	0.59	0.59	0.59	0.60
Ts/Tm	0.84	0.46	0.74	0.48	0.31	0.54
Σ Трициклических / Σ пентациклических (Σ tricyclic/ Σ pentacyclic)	0.17	0.26	0.18	0.15	0.17	0.18
Стераны/гопаны Steranes/hopanes	0.24	0.26	0.36	0.11	0.09	0.15
Показатели зрелости по ароматическим углеводородам Maturity indicators by aromatic hydrocarbons						
MPI-1	0.55			0.53	0.56	0.57
Ro (расчёт по MPI-1) (calculated by MPI-1)	0.73			0.72	0.73	0.74
MDR	2.04			1.62	1.56	1.58
Ro (расчёт по MDR) (calculated by MDR)	0.66			0.63	0.62	0.63

Примечание. β^{XB} = ХБА/ $C_{орг}$. C_{27} диа/рег = C_{27} $\alpha\beta\alpha$ 20S+20R диастераны / C_{27} $\alpha\beta\beta$ 20S+20R регулярные стераны. Ts/Tm = C_{27} 17 α (H)-трисноргопан / C_{27} 18 α (H)-триснорнеогопан. MPI-1=1.5*2-MP+3-MP/P+1-MP+9-MP. MDR=4-MDBT/1-MDBT.

Note. β^{XB} = СЕВ/ТОС. C_{27} dia/reg = C_{27} $\alpha\beta\alpha$ 20S+20R diasteranes / C_{27} $\alpha\beta\beta$ 20S+20R regular steranes. Ts/Tm = C_{27} 17 α (H)-trisorhopane / C_{27} 18 α (H)-trisorneohopane. MPI-1=1.5*2-MP+3-MP/P+1-MP+9-MP. MDR=4-MDBT/1-MDBT.

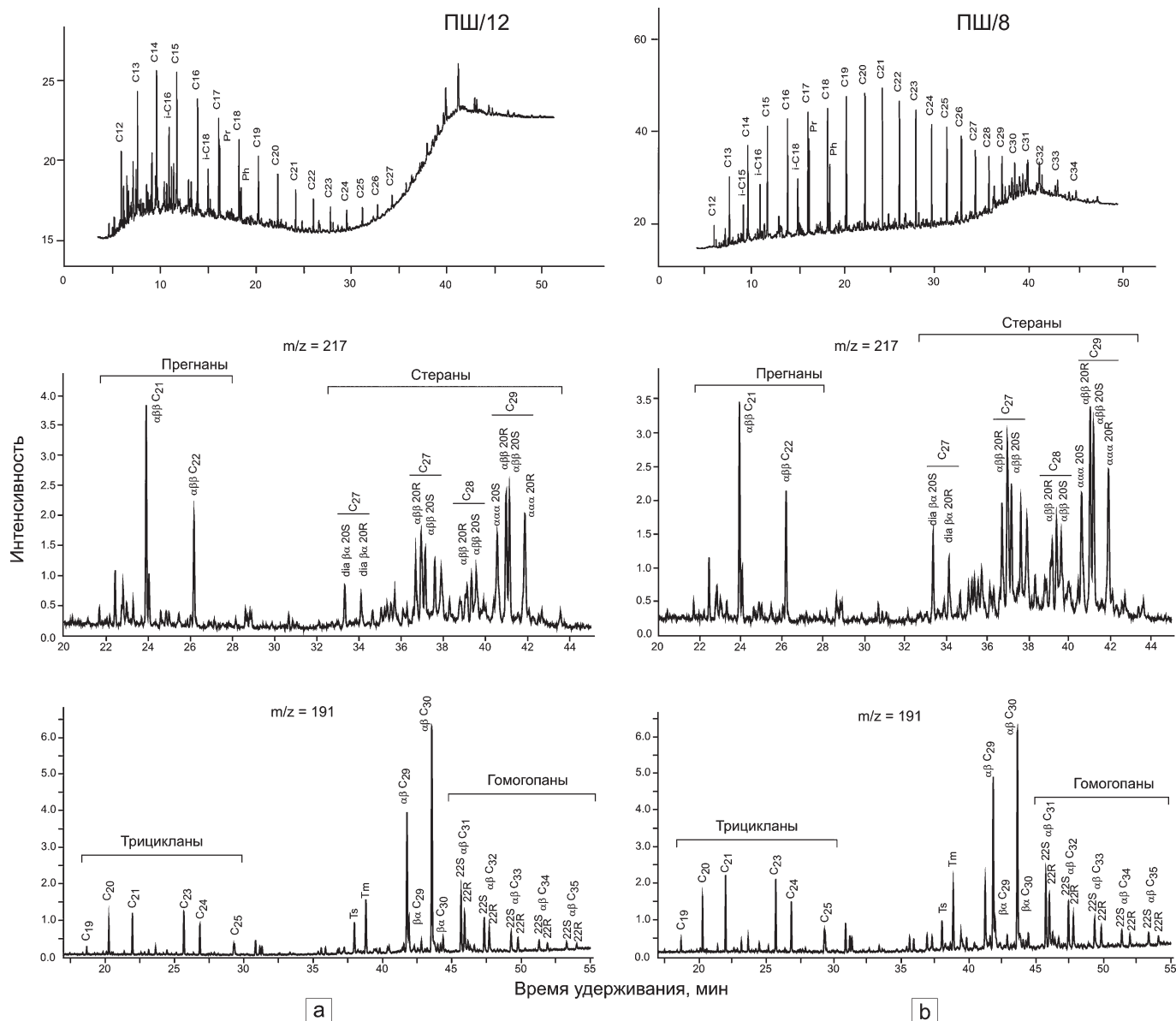


Рис. 2. Хроматограммы и масс-фрагментограммы распределения алкановых, стерановых (m/z 217) и терпановых УВ (m/z 191) насыщенной фракции битумоидов известковистых аргиллитов (а) и известняков (б)

Fig. 2. Chromatograms and mass-fragmentograms showing distributions of alkanes, steranes (m/z 217) and terpanes (m/z 191) of the saturated fractions in the extracts from calciferous argillite (a) and limestones (b)

меткой» ОВ пород и нефтей франских отложений для всего Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна [2—4].

В составе терпанов преобладают гопаны, их концентрации составляют 79–87 %. Отношение трицикланов к гопанам низкое — 0.15–0.18. Среди гопанов в максимальных содержаниях находится УВ состава C_{30} , составляя 28–34 % от суммы гопанов (рис. 2).

По составу и распределению полициклических УВ среди изученных образцов также наблюдаются различия в зависимости от литологии пород. В битумоидах известняков повышено содержание стеранов, отношение стеранов к гопанам для них составляет 0.24—0.36 (рис. 3, а; таблица). В известковистых аргиллитах величина отношения этих групп УВ не превышает 0.15. Установлено, что основным источником тритерпанов являются липиды, входящие в состав мембран бактерий [11, 16], поэтому низкие значения

отношения стеранов/гопанов свидетельствуют о преобладающем вкладе бактериального ОВ.

Изученные битумоиды также дифференцируются по биомаркерным параметрам, характеризующим литологический состав осадков, в которых накапливалось ОВ. Повышенные значения отношения трициклических терпанов C_{24}/C_{23} и увеличение отношения гомогпанов $C_{35}S/C_{34}S$ отражают преобладание карбонатного состава пород, вмещающих ОВ [12]. Среди исследованных битумоидов отклоняется от этой зависимости только образец кремнистого известняка (рис. 3, b; таблица).

Для битумоидов, выделенных из аргиллитов, характерно наличие несколько более высоких концентраций прегнанов C_{21} – C_{22} по сравнению со стеранами состава C_{27} – C_{29} , а также более высокие содержания гопанов состава C_{29} – C_{30} по отношению к гомогпанам C_{31} – C_{35} (таблица, рис. 2). По нашему мнению,

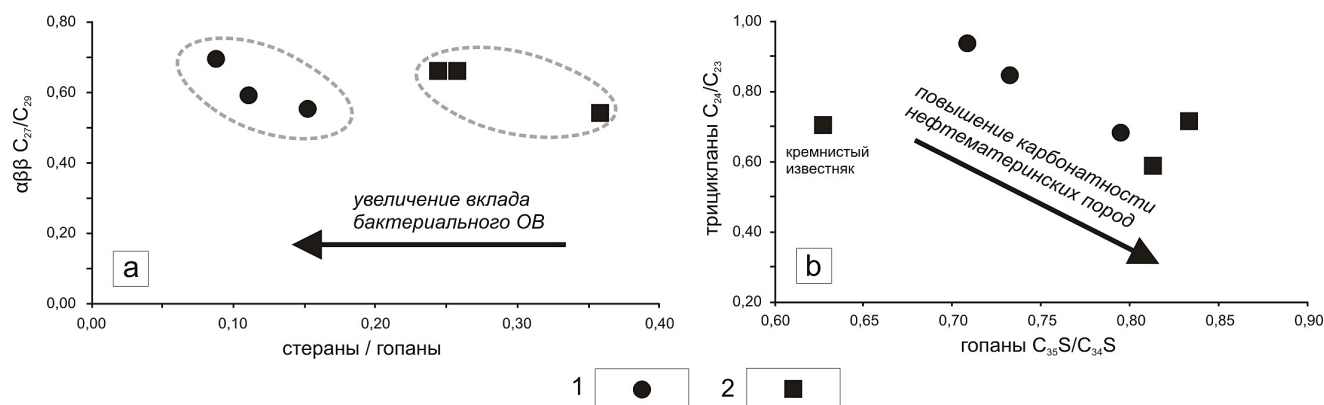


Рис. 3. Дифференциация битумоидов по биомаркерным параметрам, характеризующим состав исходного ОВ (а) и литологический состав пород (b):

1 — известковистые аргиллиты, 2 — известняки

Fig. 3. Plots of biomarker-related parameters showing the composition of organic matter (a) and source rocks lithological characteristics (b): 1 — calciferous argillite, 2 — limestones

возможно, накопление таких сравнительно короткоцепочечных производных стеранов и гопанов в аргиллитах обусловлено более высокой каталитической активностью минеральной части породы при идентичном исходном ОВ. В литературе имеются сведения, что высокие концентрации прегнанов и пониженные диастеранов характерны для восстановительных обстановок накопления ОВ, а пониженные концентрации прегнанов при повышенных концентрациях диастеранов, напротив, характерны для окислительных обстановок с привнесом терригенного материала [15].

Катагенез ОВ

Катагенетическая преобразованность ОВ устанавливалась по параметрам зрелости, рассчитанным для полициклических биомаркеров стеранового и гопанового рядов, а также по распределению ароматических УВ. Дополнительно степень катагенеза оценивалась по индексам окраски конодонтовых элементов.

Для оценки зрелости ОВ используются значения стерановых индексов $20S/20S+R$ и $\alpha\beta\beta/\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha$ для УВ состава C_{29} . Полученные значения этих индексов составляют 0.43—0.47 и 0.52—0.57 соответственно (см. таблицу), что указывает на катагенетическую преобразованность ОВ до градации $МК_2$ ($R_o \sim 0.60—0.75\%$) [12, 16]. Степень зрелости ОВ также качественно можно оценить по соотношению перегруппированных стеранов (диастеранов) $\beta\alpha C_{27}$ к регулярным. Полученные значения (> 0.3) (см. таблицу) характеризуют зрелое ОВ, достигшее главной зоны нефтегенерации [16].

Оценка катагенеза ОВ по гопановым параметрам зрелости согласуется с данными по стеранам. Значения отношения $22S/22S+R$, рассчитанные для C_{32} $\alpha\beta$ -гомогопана, достигают равновесных величин 0.59—0.62 (таблица, рис. 4), что подтверждает степень преобразованности ОВ до уровня главной зоны нефтегенерации [11, 12].

Распределение ароматических УВ также несет информацию о степени катагенетической трансформации ОВ. Наиболее широко используемыми показателями для определения уровня термической зрелости

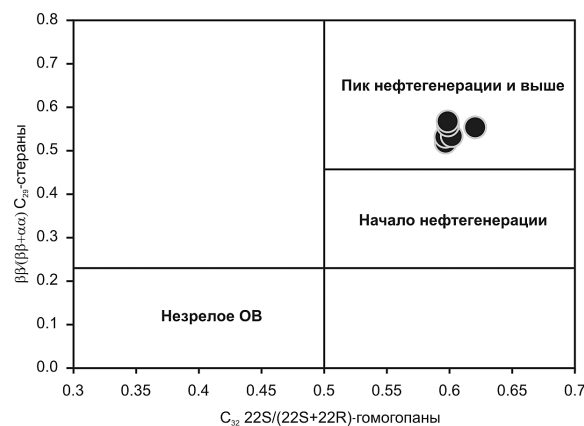


Рис. 4. Катагенетическая преобразованность ОВ по биомаркерным параметрам [12]

Fig. 4. Maturity of organic matter by biomarker parameters [12]

ОВ является метилфенантеновый индекс (MPI-1), отражающий отношение концентраций фенантрена и его гомологов [12]. Корреляционная зависимость величины MPI-1 с показателем отражения витринита (R_o , %) позволяет проводить теоретический расчет R_o . Согласно предложенным формулам расчета [14], значение R_o для исследованных образцов составляет 0.72—0.74 %.

Следующим параметром, позволяющим оценить катагенетическую преобразованность ОВ, является метилдибензотиофеновый индекс (MDR), выраженный отношением 4-МДБТ/1-МДБТ [13]. На основании предложенных формул расчета по этому показателю величина R_o составляет 0.62—0.66 %. Таким образом, согласно полученным данным показателей MPI-1 и MDR, степень катагенеза ОВ соответствует грациям конца $МК_1$ — середины $МК_2$.

Катагенетическая преобразованность определялась также по окраске конодонтовых элементов. Экспериментально установленная зависимость изменения окраски от температуры и длительности термального воздействия позволяет использовать цвет конодонтов, выраженный через индексы окраски



(ИОК), для приблизительной оценки степени термального преобразования вмещающих пород [9]. Для исследованных образцов значения ИОК изменяются в пределах 2.5–3, что соответствует температуре длительного прогрева 120–150 °C [5]. Такой уровень термального воздействия также отвечает условиям катагенеза на градации МК₁ — МК₂ [1].

Заключение

Проведенные исследования позволили получить новые данные по геохимии ОБ доманиковых отложений гряды Чернышева. Степень катагенетической преобразованности, оцененная по УВ-параметрам и данным ИОК, указывает, что отложения и заключенное в них ОБ достигло середины главной зоны нефтегенерации (МК₁ — МК₂).

Распределение алкановых и полициклических УВ-биомаркеров свидетельствуют о различном составе ОБ в зависимости от литологии вмещающих отложений. Битумоиды известковистых аргиллитов отличаются от битумоидов карбонатных отложений повышенным вкладом бактериального материала в составе исходного ОБ. Учитывая неоднородность состава ОБ доманиковых отложений, нефтяные продукты его преобразования будут иметь различные параметры УВ-биомаркеров.

Аналитические исследования выполнялись в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (ЦКП «Геонаука», г. Сыктывкар).

Литература

1. Аммосов И. И., Горшков В. И., Грецишников Н. П., Еремин И. В., Прянишников В. К., Степанов Ю. В. Петрология органических веществ в геологии горючих ископаемых. М.: Наука, 1987. 333 с.
2. Баженова Т. К., Шиманский В. К., Васильева В. Ф., Шапиро А. И., Яковлева (Гембицкая) Л. А., Климова Л. И. Органическая геохимия Тимано-Печорского бассейна. СПб.: ВНИГРИ, 2008. 164 с.
3. Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Валяева О. В., Деревесникова А. А. Геохимия нефтей позднего девона Тимано-Печорского бассейна // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. С. 410–422.
4. Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Журавлев А. В. Органическое вещество верхнедевонских отложений гряды Чернышева // Геохимия. 2017. № 6. С. 527–538.
5. Журавлев А. В. Оценка степени термального катагенеза палеозойских отложений севера Пай-Хойского паравтохтона по индексам окраски конодонтов // Литосфера. 2017. № 1. С. 44–52.
6. Клименко С. С., Анищенко Л. А. Особенности нафтидогенеза в Тимано-Печорском нефтегазоносном бассейне // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 2. С. 61–69.
7. Пармузина Л. В. Верхнедевонский комплекс Тимано-Печорской провинции (строение, условия образования, закономерности размещения коллекторов и нефтегазоносность). СПб.: Недра, 2007. 152 с.
8. Першина А. И. Силурийские и девонские отложения гряды Чернышева. Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 122 с.
9. Epstein A. G., Epstein J. B., Harris L. D. Conodont color alteration — an index organic metamorphism / U. S. Geological Survey Professional Paper 995, 1977. 27 p.

10. Huang W. Y., Meinschein W. G. Sterols as ecological indicators // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. V. 43. P. 739–745.

11. Peters K. E., Moldowan J. M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum // *Organic Geochemistry*. 1991. V. 17. P. 47–61.

12. Peters K. E., Walters C. C., Moldowan J. M. The biomarker guide. Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history. 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2005. Vol. 2. 1155 p.

13. Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils // *Marine and petroleum geology*. 1988. V. 5. P. 224–236.

14. Radke M., Welte D. H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type // *Organic Geochemistry*. 1986. V. 10. P. 51–63.

15. Wang G., Chang X., Wang T.-G., Simoneit B. R. T. Pregnanes as molecular indicators for depositional environments of sediments and petroleum source rocks // *Organic Geochemistry*. 2015. V. 78. P. 110–120.

16. Waples D. W., Machihara T. Biomarkers for geologist — a practical guide to the application of steranes and triterpanes in petroleum geology // *AAPG methods and exploration*. 1991. No. 9. 71 p.

References

1. Ammosov I. I., Gorshkov V. I., Grechishnikov N. P., Yerein I. V., Pryanishnikov V. K., Stepanov Y. V. *Petrologiya organicheskikh veshchestv v geologii goryuchikh iskopayemykh* (Petrology of organic matter in the geology of fossil fuels). Moscow: Nauka, 1987, 333 p.
2. Bazhenova T. K., Shimanskiy V. K., Vasilyeva V. F., Shapiro A. I., Yakovleva (Gembitskaya) L. A., Klimova L. I. *Organicheskaya geokhimiya Timano-Pechorskogo basseyna* (Organic geochemistry of the Timan-Pechora basin). Saint-Petersburg: VNIGRI, 2008, 164 p.
3. Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Valyayeva O. V., Derevesnikova A. A. *Geokhimiya neftey pozdnego devona Timano-Pechorskogo basseyna* (Geochemistry of Late Devonian oils of the Timan-Pechora basin). *Geologiya i geofizika*, 2017, No. 58, pp. 410–422.
4. Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Zhuravlev A. V. *Organicheskoye veshchestvo verkhnedevonskikh otlozheniy gryady Chernysheva* (Organic matter in Upper Devonian deposits of the Chernyshev Ridge). *Geokhimiya*, 2017, No. 6, pp. 527–538.
5. Zhuravlev A. V. *Otsenka stepeni termalnogo katageneza paleozoysskikh otlozheniy severa Paykhoyskogo paravtokhtona po indeksam okraski konodontov* (Estimation of Paleozoic rocks thermal maturity of the Northern Pay-Khoy parautochthone on the basis of conodonts color alteration indexes). *Litosfera*, 2017, No. 1, pp. 44–52.
6. Klimenko S. S., Anischenko L. A. *Osobennosti naftidogeneza v Timano-Pechorskom neftegazonosnom basseyne* (Features of evolution of naphthide genesis of Timan-Pechora basin). *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* (Proceedings of the Komi Science Centre UB RAS), 2010, No. 2, pp. 61–69.
7. Parmuzina L. V. *Verkhnedevonskiy kompleks Timano-Pechorskoy provintsii (stroeniye, usloviya obrazovaniya, zakonornosti razmeshcheniya kollektorov i neftegazonosnost)* (The Upper Devonian complex of the Timan-Pechora Province (structure, formation conditions, regularities of reservoir location and oil and gas potential)). Saint-Petersburg: Nedra, 2007, 152 p.



8. Pershina A. I. *Siluriyskiye i devonskiye otlozheniya gryady Chernysheva* (Silurian and Devonian deposits of the Chernyshev ridge). Saint-Petersburg: AN SSSR, 1962, 122 p.
9. Epstein A. G., Epstein J. B., Harris L. D. Conodont color alteration — an index organic metamorphism. U. S. Geological Survey Professional Paper 995, 1977, 27 p.
10. Huang W. Y., Meinschein W. G. Sterols as ecological indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, V. 43, pp. 739—745.
11. Peters K. E., Moldowan J. M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum. *Organic Geochemistry*, 1991, V. 17, pp. 47—61.
12. Peters K. E., Walters C. C., Moldowan J. M. The biomarker guide. Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history. 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2005, Vol. 2, 1155 p.
13. Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils. *Marine and petroleum geology*, 1988, V. 5, pp. 224—236.
14. Radke M., Welte D. H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type. *Organic Geochemistry*, 1986, V. 10, pp. 51—63.
15. Wang G., Chang X., Wang T.-G., Simoneit B. R. T. Pregnanes as molecular indicators for depositional environments of sediments and petroleum source rocks. *Organic Geochemistry*, 2015, V. 78, pp. 110—120.
16. Waples D. W., Machihara T. Biomarkers for geologist — a practical guide to the application of steranes and triterpanes in petroleum geology. AAPG methods and explanation, 1991, No. 9, 71 p.



НОВЫЕ НАХОДКИ РЕДКИХ СУЛЬФИДОВ Ni, Zn, Cr, Cu И V В КАРБОНАТИТАХ ЮЖНОГО УРАЛА

В. Г. Кориневский, В. А. Котляров, С. В. Колисниченко

Институт минералогии ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН, Миасс; vgkor@mineralogy.ru

Впервые приведены сведения о находке в дайке доломит-кальцитового карбонатита в Светлинском золоторудном месторождении на Южном Урале редких сульфидов Ni, Zn, Cu, Cr и V: ваэсита, калининита, сульванита и патронита. Они имеют поверхности одновременного роста друг с другом и с окружающими кристаллами доломита и кальцита. Чрезвычайно мелкие размеры кристаллов (менее 30 мкм) не дают возможности изучить физические свойства минералов, дать их рентгеновскую характеристику. Данные о химическом составе сульфидов получены на СЭМ РЕММА-202 М. Сульфиды (в том числе пирит) встречены в виде очень мелкой рассеянной вкрапленности в тёмных полосах карбонатитов, обогащенных кристаллами фторфлогопита, самородной серой и сероводородом, локализованных в микропористых участках кристаллов кальцита. Подчеркнута приуроченность таких сульфидов во всех их проявлениях преимущественно к карбонатным породам. Повсеместная обогащенность минералов-примесей в таких карбонатитах фтором, хромом, ванадием и никелем может свидетельствовать об участии в их формировании флюидов ультраосновной-щелочной магмы. Этому способствовало наличие в них углекислоты и сероводорода.

Ключевые слова: ваэсит, калининит, сульванит, патронит, карбонатиты, Южный Урал.

NEW FINDINGS OF RARE Ni, Zn, Cr, Cu AND V SULPHIDES IN CARBONATITES OF SOUTH URALS

V. G. Korinevsky, V. A. Kotlyarov, S. V. Kolisnichenko

Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass

For the first time, information is provided on the discovery of rare dolomite-calcite carbonatite in the dyke in the Svetlinsky gold ore deposit in the South Urals, rare sulfides of Ni, Zn, Cu, Cr and V: vaesite, kalininit, sulvanite and patronite. With each other and with the surrounding crystals of dolomite and calcite, they have surfaces of simultaneous growth. Extremely small sizes crystals (less than 30 microns) make it impossible to study the physical properties of minerals, to give their X-ray characteristics. Data on the chemical composition of sulfides was obtained by SEM REMMA-202 M. Sulfides (including pyrite) were found in the form of very fine dispersed impregnation in the dark bands of carbonatites enriched with fluorophlogopite crystals, native sulfur and hydrogen sulfide localized in microporous areas of calcite crystals. The confinement of such sulfides in all their occurrences mainly to carbonate rocks is emphasized. The ubiquitous enrichment of mineral impurities in such carbonatites with fluorine, chromium, vanadium and nickel may indicate the participation of ultrabasic-alkaline magma fluids in their formation. This was favoured by the presence of carbon dioxide and hydrogen sulfide in them.

Keywords: vaesite, kalininitie, sulvanite, patronite, carbonatites, South Urals.

Введение

В недавней работе [4] охарактеризован редкий сульфид Ni — ваэсит, впервые обнаруженный в доломит-кальцитовом карбонатите из дайки в Светлинском золоторудном месторождении в Пластовском районе Челябинской области на Южном Урале. Дополнительное изучение минерального состава этой породы привело к обнаружению здесь ещё трёх столь же редких сульфидов Zn, Cr, Cu и V: калининита, сульванита и патронита. Это вносит существенный вклад в топоминералогии специфичных доломит-кальцитовых карбонатитов Южного Урала.

Материал и методы исследования

Из протоочки карбонатита были отобраны осколки, относительно обогащённые мелкой сульфидной вкрапленностью. Индивиды большинства минералов настолько малы, что трудно распознаются даже под бинокулярным микроскопом. Химический состав минералов определялся В. А. Котляровым на сертифицированном растровом электронном микроскопе РЭММА-202М с энергодисперсионной приставкой LZ-5 Link Systems с Si-Li-детектором. Работа велась на полированных зёрнах в эпоксидной матрице с углеродным напылением при ускоряющем напряжении 20 кВ, малом токе электронного пучка ($3 \cdot 10^{-10}$ а) и минимальном диаметре пучка (1–2 мкм).

Коррекция данных производилась с помощью программ Magallanes и ZAF. В качестве эталонов сравнения использовались шашка стандартов № 01-044 Mineral Mount 25—53 фирмы ASTIMEX Scientific Ltd., а также чистые элементы и их соединения из стандартной шашки № 1362 фирмы Micro-Analysis Consultants Ltd. и проанализированные ранее природные минералы. Большинство элементов определялось по спектральным линиям К-серии, а Pb, U, Hf — по линиям L-серии. Стандартами для измеренных элементов послужили диопсид (Mg, Ca, Si), жадеит (Al), родонит (Mn), альбит (Na), ортоклаз (K), соединения TiO_2 (Ti), Fe_2O_3 (Fe), халькопирит (Cu), сфалерит (S, Zn), галенит (Pb) и чистые элементы V, Cr, Cd, Ni, Co. Для большинства элементов нижние пределы обнаружения составляли 0.2–0.3 %.

Особенности минерального состава карбонатитовой дайки

Образцы крупнозернистой карбонатной породы отобраны на верхних уступах восточной стенки карьера месторождения из меридиональной дайки вертикального залегания мощностью 0.4 м и видимой протяженностью более 20 м. Координаты обнажения: 54°17'38" с. ш., 60°25'21" в. д. Петрографическая характеристика породы, доказательства её магматического происхождения приведены в статье [4], там же

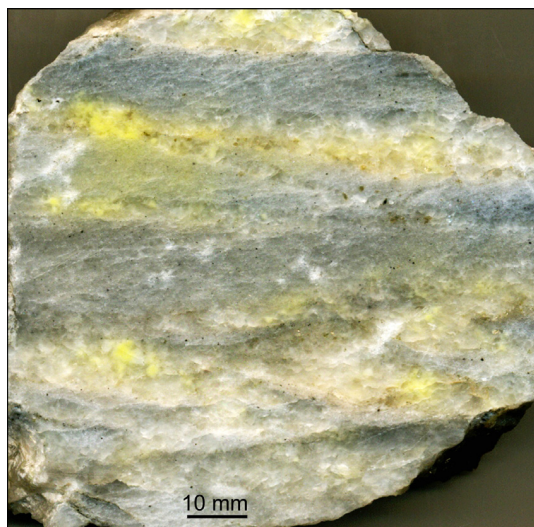


Рис. 1. Полосчатая текстура серосодержащего флогопитового доломит-кальцитового карбонатита из дайки в Светлинском карьере. Тёмные полосы обогащены флогопитом и рассеянной мелкой вкрапленностью сульфидов

Fig. 1. Striped texture of sulfur-containing phloggopitic dolomite-calcite carbonatite from the dyke in the Svetlinskiy quarry. Dark bands are enriched with phlogopite and dispersed fine impregnation of sulfides

отмечено, что она содержит рассеянную мелкую вкрапленность сульфидов, флогопита, тремолита и кварца, мелкозернистые жёлтые полосовидные выделения самородной серы совместно с кальцитом. В этой дайке наблюдаются также миаролы с кристаллами серы, кварца и флюорита.

Основная масса сульфидов концентрируется в тёмных полосах (рис. 1). Описанные ранее [4] идиоморфные кристаллы ваэсита неравномерно размещены в кальцитовой матрице породы. Редкие сульфиды Cr, Cu и V (калининит, сульванит и патронит) находятся в виде ксеноморфных зёрен преимущественно в пределах выделений доломита или вдоль его границ с кристаллами кальцита (рис. 2, b, c, d). В такой же ситуации располагаются и очень мелкие зёрна рутила, который иногда замещается титанитом (рис. 2, b). Необычным выглядит обогащение рутила ванадием и хромом. Их содержание в разных зёрнах сильно варьирует: V_2O_5 — от 4.2 до 20.58 мас. %, Cr_2O_3 — от 2.79 до 7.11 мас. % (табл. 1, ан. 9—12). В титаните содержится V_2O_5 — 4.67 мас. %, Cr_2O_3 — 1.61 мас. % (табл. 1, ан. 8). В этих же тёмных прослоях в карбонатите, помимо обычного для него фторфлогопита (табл.1, ан. 3), встречаются мелкие выделения уранинита (табл.1, ан. 7), мухинит, а также нехарактерные для доломит-кальцитовых карбонатитов амфиболы:

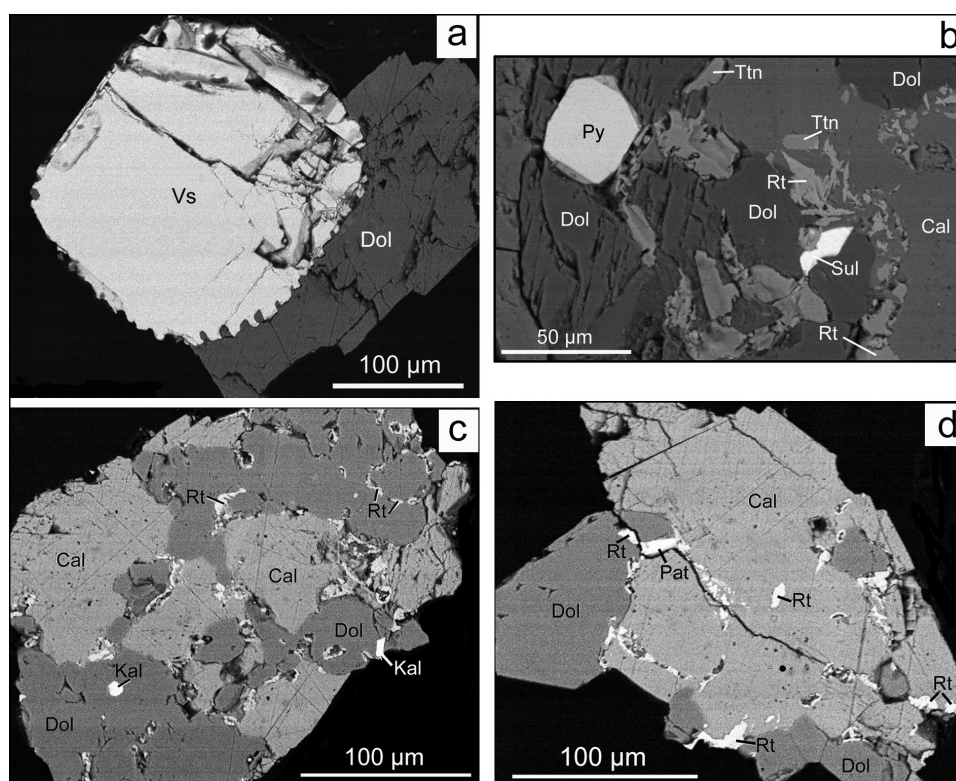


Рис. 2 . Редкие сульфиды из дайки флогопитового доломит-кальцитового карбонатита из Светлинского карьера: а — пилообразная индукционная граница поверхности одновременного роста ваэсита (Vs) и доломита (Dol); б — выделения сульванита (Sul), рутила (Rt), титанита (Ttn) и пирита (Py) располагаются на контакте или вблизи от него зерен доломита (Dol) и кальцита (Cal); в — кристаллы калининита (Kal) располагаются внутри зёрен доломита (Dol); д — выделения патронита (Pat) и рутила (Rt) располагаются вдоль контакта зёрен доломита (Dol) и кальцита (Cal). Фото в отражённых электронах, СЭМ РЭММА-202М

Fig. 2. Rare sulfides from the dyke of phlogopite dolomite-calcite carbonatite from the Svetlinskiy quarry: а — sawtooth induction surface boundary of simultaneous growth of vaesite (Vs) and dolomite (Dol); б — the allocations of sulvanite (Sul), rutile (Rt), titanite (Ttn), and pyrite (Py) are located at or near the contact of dolomite (Dol) and calcite (Cal) grains; в — kalininite crystals (Kal) are located inside dolomite grains (Dol); д — the allocations of patronite (Pat) and rutile (Rt) are located along the contact of dolomite grains (Dol) and calcite (Cal). BSE images, SEM REMMA-202M



Таблица 1. Состав минералов (мас. %), ассоциирующих с сульфидами в дайке доломит-кальцитового карбонатита в Светлинском карьере (проба СВ-А)

Table 1. The composition of minerals (wt. %), associated with sulfides, in a dike of dolomite-calcite carbonatite in the Svetlinskiy quarry (probe CB-A)

Минерал Mineral	<i>Cal</i>	<i>Dol</i>	<i>Phl</i>	<i>Mhb</i>	<i>Sdg</i>	<i>Spl</i>	<i>Urn</i>	<i>Tin</i>	<i>Rt</i>			
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂			42.80	52.95	39.59	—		28.11				
TiO ₂			—	—	0.68	—		33.70	92.23	90.54	76.54	73.37
Al ₂ O ₃			11.83	5.63	18.73	62.23		2.46				
Cr ₂ O ₃			—	—	—	0.19		1.61	2.79	2.46	7.11	5.61
FeO	—		—	7.62	13.28	29.17		—	—	—	0.27	—
MnO	—		—	—	0.13	0.12		—	—	—	0.26	—
MgO	2.04	21.24	26.45	19.42	10.07	7.63		—	—	—	—	—
CaO	53.29	30.81	—	12.17	12.25			28.94				
Na ₂ O			0.33	0.56	1.57							
K ₂ O			9.24	—	0.62							
F			5.92									
O=2F			-2.49									
Cl				—	0.30							
O=2Cl					-0.07							
PbO							4.16	—	—	—	—	—
SO ₃	0.44	—										
V ₂ O ₅		—	—	—	—	—		4.67	4.20	6.38	15.04	20.58
UO ₂							88.83					
ThO ₂							0.80					
Сумма /Total	55.77	52.05	94.08	98.35	97.15	99.34	93.79	99.49	99.22	99.40	99.22	99.56

Кристаллохимические формулы / Crystal-chemical formulas:

1. Ca_{0.944}Mg_{0.050}SO_{0.005}CO₃ (на 1 катион), 2. Ca_{1.021}Mg_{0.979}(CO₃)₂ (на 2 катиона),
3. (K_{0.852}Na_{0.048})_{0.9}(Mg_{2.851}Al^{VI}_{0.102})_{2.953}(Si_{3.094}Al^{IV}_{0.906})₄O₁₀(F_{1.354}OH_{0.646})₂ (на 22 заряда),
4. Na_{0.075}(Ca_{1.803}Fe²⁺_{0.122}Na_{0.075})₂(Mg_{4.003}Fe³⁺_{0.44}Fe²⁺_{0.319}Al_{0.238})₅(Si_{7.321}Al_{0.679})₈O₂₂((OH)₂)₂ (на 24 O),
5. (Na_{0.412}K_{0.117})_{0.529}(Ca_{1.934}Na_{0.037}Mn_{0.016}Fe²⁺_{0.013})₂(Mg_{2.212}Al_{1.088}Fe²⁺_{1.038}Fe³⁺_{0.44}Fe²⁺_{0.586}Ti_{0.075})_{4.999}(Si_{5.835}Al_{2.165})₈O₂₂((OH)_{1.774}O_{0.151}Cl_{0.075})₂ (на 24 O)
6. (Fe²⁺_{0.668}Mg_{0.311}Cr_{0.004}Mn_{0.003})_{0.986}Al_{2.008}O₄ (на 4 O), 7. (U_{0.964}Pb_{0.055}Th_{0.009})_{1.028}O₂ (на 2 O),
8. Ca_{1.021}(Ti_{0.834}V⁵⁺_{0.102}Cr_{0.042})_{0.978}(Si_{0.925}Al_{0.095})_{1.020}O₅ (на 5 O), 9. (Ti_{0.931}V⁵⁺_{0.037}Cr_{0.030})_{0.998}O₂ (на 2 O),
10. (Ti_{0.910}V⁵⁺_{0.056}Cr_{0.026})_{0.992}O₂ (на 2 O), 11. (Ti_{0.773}V⁵⁺_{0.133}Cr_{0.076}Fe_{0.003}Mn_{0.003})_{0.988} (на 2 O),
12. (Ti_{0.731}V⁵⁺_{0.180}Cr_{0.059})_{0.970}O₂ (на 2 O)

Примечание. *Cal* — кальцит, *Dol* — доломит, *Phl* — флогопит, *Mhb* — магнезиоферригорнблендит, *Sdg* — садаганаит, *Spl* — шпинель (плеонаст), *Urn* — уранинит, *Tin* — титанит, *Rt* — рутил. Пустая клетка — не определялось, прочерк — не обнаружены. В отдельных зёрнах доломита определен (мас. %) SrO (0.26—0.53), а в кальците — SrO (0.58) и SO₃ (0.36—0.44). Анализы выполнены В. А. Котляровым, СЭМ РЭММА-202М.

Note. *Cal* — calcite, *Dol* — dolomite, *Phl* — phlogopite, *Mhb* — magnesio-ferri-hornblend, *Sdg* — sadanagaite, *Spl* — spinel (pleonast), *Urn* — uraninite, *Tin* — titanite, *Rt* — rutile. Empty cell — was not determined, dash — not found. SrO (0.26—0.53) was determined (wt. %) in individual Dol grains, while SrO (0.58) and SO₃ (0.36—0.44) in Cal. The analyses were performed by V. A. Kotlyarov with an electronic scanning microscope REMMA-202M.

магнезиоферригорнблендит (табл. 1, ан. 4) и саданагаит (табл. 1, ан. 5) [10], железистая шпинель (плеонаст, табл. 1, ан. 6). Следует отметить, что маломощная (0.4 м) дайка карбонатита содержит цветные полосы с разным набором аксессуарных минералов.

Желтая окраска кристаллов кальцита в отдельных полосах в карбонатите обусловлена присутствием микропор поперечником в несколько микрометров (рис. 3), в которых содержится сера, а также сероводород, запах которого отчетливо отмечается при дроблении породы. Наличие серы иногда фиксируется в составе отдельных кристаллов кальцита (табл. 1, ан. 1).

Взаимоотношения минералов в карбонатите, особенности их морфологии и характера распределения в

породе позволяют сказать, что главные породообразующие минералы (кальцит и доломит) и основная масса аксессуарных образовались одновременно [4]. Более поздняя ассоциация представлена самородной серой, кварцем и флюоритом.

Редкие для карбонатитов сульфиды Ni, Zn, Cu, Cr и V

В описываемых тёмных прослоях доломит-кальцитовых карбонатитов сульфиды составляют очень мелкие выделения, преимущественно внутри зёрен доломита либо на контакте их с кристаллами кальцита (рис. 2). В отдельных случаях между ними можно на-



блюдают извилистые границы поверхностей синхронного роста. Это ярко проявлено в виде пилообразной границы ваэсита и соприкасающегося с ним доломита (рис. 2, а), также плавно изогнутой границы сульванита и пирита (рис. 4).

Ваэсит в тёмных прослоях встречается значительно чаще, чем во вмещающей породе. Его кристаллы обычно крупнее (до 230 мкм), чем другие сульфиды, но по морфологии они подобны тем зёрнам ваэсита, что рассеяны в кальцитовый массу породы. Нередко ваэсит образует сростки с пиритом и сульванитом. Существенных различий в химическом составе ваэсита из тёмных прослоев (табл. 2, ан. 2—5) и из кальцитового агрегата [4] не наблюдается. Тот и другой содержат большое количество Cu (до 9 мас. %), относительно мало Fe (менее 4.81 мас. %) при отсутствии Co. Состав ваэсита близок к его стехиометрической формуле $(\text{Ni}, \text{Cu}, \text{Fe})\text{S}_2$.

Калининит встречен в виде двух мелких кристалликов квадратного (8 мкм) и призматического (3.6 х 10.8 мкм) сечений внутри зёрен доломита (рис. 2, с). Они содержат небольшую примесь V, Cd и Cu (табл. 2, ан. 10—11) и хорошо рассчитываются на формулу $(\text{Zn}, \text{Cu}, \text{Cd})(\text{Cr}, \text{V})_2\text{S}_4$.

Сульванит в виде мелких кристаллов квадратного сечения поперечником 16 мкм (рис. 4) либо более сложной формы (рис. 2, b), размером 13×20 мкм обычно встречается как включения в зёрнах доломита. При этом отмечены случаи его срастания с ваэситом, пиритом и рутилом. Химический состав большинства выделений сульванита (табл. 3, ан. 4—11) близок к типовым разновидностям этого минерала, иногда отличаюсь от них присутствием примеси Fe (0.3—0.9 мас. %). Наблюдается хорошее соответствие состава сульванита его идеализированной формуле $(\text{Cu}, \text{Fe})_3\text{VS}_4$.

Патронит был встречен лишь однажды в форме удлинённого зерна размером 3×23 мкм (рис. 2, d) на границе между зёрнами доломита и кальцита. Примесей в минерале не обнаружено, по составу он близок к патрониту из Перу [14] и отвечает формуле VS_4 .

Обсуждение результатов

Упомянутые выше сульфиды относятся к очень редким минералам, которые на территории России были выявлены вначале на Дальнем Востоке (калининит) [8, 12], затем в Заполярье (сульванит, патронит) [3, 5], на Среднем (калининит) [2] и Южном Урале

Таблица 2. Состав ваэсита и калининита (мас. %) в дайке доломит-кальцитового карбонатита в Светлинском карьере (проба СВ-А)

Table 2. The composition of vaesite and kalininite (wt. %) in a dike of dolomite-calcite carbonatite in the Svetlinskiy quarry (probe CB-A)

Минерал Mineral	Ваэсит (<i>Vs</i>) / Waesite					Калининит (<i>Kal</i>) / Kalininite					
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S	52.22	51.69	51.94	52.70	52.62	43.09	39.46	39.80	42.22	43.37	42.83
Cr					0.36	34.94	36.12	36.42	34.10	35.00	35.21
Fe		4.86	4.81	3.09	2.37		1.82	1.72			
Mn							2.36	2.02			
Ca							—	0.24			
Zn						21.97	18.06	18.40	18.89	18.90	19.18
Ni	47.78	33.81	33.78	36.91	36.94						
Cu		8.66	9.09	6.84	7.43				2.73	1.32	1.09
Cd										0.83	0.60
V									0.61	0.35	0.14
Sb									0.73		
Сумма Total	100.00	99.02	99.62	99.54	99.72	100.00	97.82	98.60	99.28	99.77	99.05
Кристаллохимические формулы / Crystal-chemical formulas:											
1. $\text{Ni}_{0.998}\text{S}_2$, 2. $(\text{Ni}_{0.713}\text{Cu}_{0.169}\text{Fe}_{0.108})_{0.990}\text{S}_2$, 3. $(\text{Ni}_{0.709}\text{Cu}_{0.176}\text{Fe}_{0.106})_{0.991}\text{S}_2$, 4. $(\text{Ni}_{0.764}\text{Cu}_{0.131}\text{Fe}_{0.067})_{0.962}\text{S}_2$, 5. $(\text{Ni}_{0.766}\text{Cu}_{0.142}\text{Fe}_{0.052})_{0.960}\text{S}_2$, 6. $\text{Zn}_{0.998}\text{Cr}_{1.997}\text{S}_4$, 7. $(\text{Zn}_{0.896}\text{Mn}_{0.139}\text{Fe}_{0.106})_{1.141}\text{Cr}_{2.254}\text{S}_4$, 8. $(\text{Zn}_{0.905}\text{Mn}_{0.118}\text{Fe}_{0.099}\text{Ca}_{0.011})_{1.133}\text{Cr}_{2.253}\text{S}_4$, 9. $(\text{Zn}_{0.876}\text{Cu}_{0.118}\text{V}_{0.036}\text{Sb}_{0.011})_{1.060}\text{Cr}_{1.989}\text{S}_4$, 10. $(\text{Zn}_{0.853}\text{Cu}_{0.061}\text{Cd}_{0.022}\text{V}_{0.020})_{0.956}\text{Cr}_{1.987}\text{S}_4$, 11. $(\text{Zn}_{0.877}\text{Cu}_{0.051}\text{Cd}_{0.016}\text{V}_{0.008})_{0.952}\text{Cr}_{2.024}\text{S}_4$											

Примечание. 1—5 — ваэсит: 1 — [14], 2—5 — из дайки карбонатитов (проба СВ-А); 6—11 — калининит: 6 — [14], 7, 8 — из кальцитового карбонатита в осевой зоне дайки плагиоклазита в Косвинском камне на Северном Урале [2], 9 — из диопсид-гранатовых пород среди мраморов карьера Перевал в Южном Прибайкалье [8], 10, 11 — из дайки карбонатитов (проба СВ-А). Пустая клетка — не определялось, прочерк — не обнаружены. Анализы выполнены В. А. Котляровым, СЭМ РЭММА-202М. Расчет ф.к. минералов произведён на 2 атома S для анализов 1—5 и на 4 атома S для анализов 6—11.

Note. 1—5 — vaesite: 1 — [14], 2—5 — from a dike of carbonatites (probe CB-A); 6—11 — kalininite: 6 — [14], 7, 8 — from a calcite carbonatites in axial zone of plagioclase dike in the Kosvinskiy stone at the North Urals [2], 9 — from the diopside-garnet rocks among marbles of Pereval quarry at the South Baikal area [8], 10, 11 — from a dike of carbonatites (probe CB-A). Empty cell — was not determined, dash — not found. The analyses were performed by V. A. Kotlyarov with an electronic scanning microscope REMMA-202M. Calculation of *apfu* of minerals produced on 2 atoms of S for analyses 1—5, and on 4 atoms of S for analyses 6—11.



Таблица 3. Состав сульванита и патронита (мас. %) в дайке доломит-кальцитового карбонатита в Светлинском карьере (проба СВ-А)

Table 3. Composition of sylvanite and patronite (wt. %) in a dike of dolomite-calcite carbonatite in the Svetlinskiy quarry (probe CB-A)

Минерал Mineral	Сульванит (Sul) / Sylvanite											Патронит (Pat) Patronite	
№ ан. S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
S	34.68	34.68	34.40	34.31	34.20	34.50	35.05	35.31	34.68	34.43	35.02	71.57	70.91
Fe				—	—	—	0.91	0.72	0.34	—	—	—	—
Cu	51.55	51.54	51.60	51.15	51.13	51.04	49.42	49.99	50.51	51.38	50.66	—	—
V	13.77	13.78	14.30	13.74	13.88	13.92	13.82	13.78	13.72	13.76	13.90	28.43	28.16
Сумма Total	100.0	100.0	100.30	99.20	99.21	99.46	99.20	99.80	99.25	99.57	99.58	100.00	99.07
Кристаллохимические формулы / Crystal-chemical formulas:													
1. $\text{Cu}_{2.995}\text{V}_{0.998}\text{S}_4$, 2. $\text{Cu}_{2.994}\text{V}_{0.999}\text{S}_4$, 3. $\text{Cu}_{3.022}\text{V}_{1.045}\text{S}_4$, 4. $\text{Cu}_{3.004}\text{V}_{1.007}\text{S}_4$, 5. $\text{Cu}_{3.012}\text{V}_{1.020}\text{S}_4$, 6. $\text{Cu}_{2.981}\text{V}_{1.014}\text{S}_4$, 7. $(\text{Cu}_{2.841}\text{Fe}_{0.060})_{2.901}\text{V}_{0.991}\text{S}_4$, 8. $(\text{Cu}_{2.852}\text{Fe}_{0.047})_{2.899}\text{V}_{0.981}\text{S}_4$, 9. $(\text{Cu}_{2.934}\text{Fe}_{0.022})_{2.956}\text{V}_{0.994}\text{S}_4$, 10. $\text{Cu}_{3.007}\text{V}_{1.004}\text{S}_4$, 11. $\text{Cu}_{2.915}\text{V}_{0.998}\text{S}_4$, 12. $\text{V}_{0.998}\text{S}_4$, 13. $\text{V}_{0.998}\text{S}_4$													

Примечание. 1—11 — сульванит: 1 — [14], 2 — [3], 3 — [13], 4 — 11 — из дайки карбонатитов (проба СВ-А); 12—13 — патронит: 12 — [14], 13 — из дайки карбонатитов (проба СВ-А). Пустая клетка — не определялось, прочерк — не обнаружены. Анализы выполнены В. А. Котляровым, СЭМ РЭММА-202М. Расчет ф.к. минералов произведен на 4 атома S.

Note. 1—11 — sylvanite: 1 — [14], 2 — [3], 3 — [13], 4 — 11 — from a dike of carbonatites (probe CB-A); 12—13 — patronite: 12 — [14], 13 — from a dike of carbonatites (probe CB-A) Empty cell — was not determined, dash — not found. The analyses were performed by V. A. Kotlyarov with an electronic scanning microscope REMMA-202M. Calculation of *apfu* of minerals produced on 4 atoms of S.

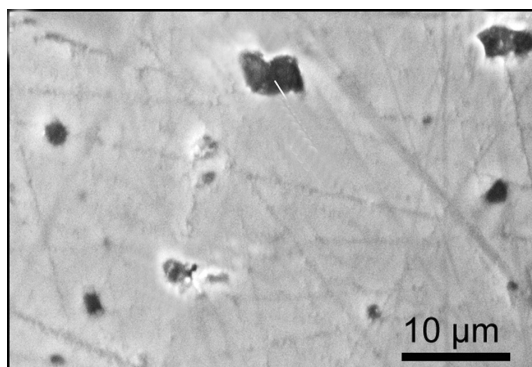


Рис. 3. Микропоры (тёмные пятна) в кристаллах кальцита, заполненные самородной серой и углеводородами. Фото во вторичных электронах, СЭМ РЭММА-202М

Fig. 3. Micropores (dark spots) in calcite crystals filled with native sulfur and hydrocarbons. Photo in secondary electrons, SEM REMMA-202M

(калининит, ваэсит) [1, 4]. Примечательно, что все эти находки сделаны в карбонатных породах (мраморы, мраморизованные известняки, кварц-карбонатные жилы). Вмещающие породы однозначно трактуются как карбонатиты лишь некоторыми исследователями [7, 2, 4], в других случаях их принято считать гидротермально-метасоматическими [3, 5] или метаморфическими [8, 12]. Обращаем внимание на то, что мраморные толщи Прибайкалья, где был встречен калининит [8], во многих случаях содержат в себе рвущие тела крупнозернистых карбонатитов [6], которые предыдущими исследователями также принимались за мраморы и кальцифиры. Вероятно, такая же ситуация имеет место и в Итальянских Альпах, где мраморы содержат рассеянную вкрапленность идиоморфных кристаллов ваэсита [11] и сульванита [9], росших совместно с окружающим их кальцитом.

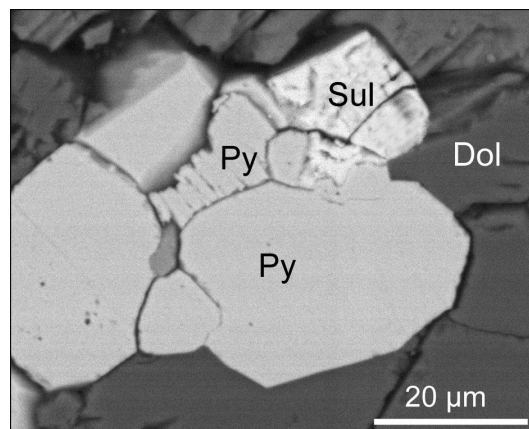


Рис. 4. Сrostок кристалла сульванита (Sul) с пиритом (Py) среди зёрен доломита (Dol). Sul имеет с Py извилистую границу одновременного роста. Фото в BSE, СЭМ РЭММА-202М

Fig. 4. A joint of sylvanite crystal (Sul) with pyrite (Py) among dolomite grains (Dol). Sul has with Py a sinuous border of simultaneous growth. Photo in BSE, SEM REMMA-202M

Такая приуроченность описываемых сульфидов к карбонатным породам может говорить об участии углекислых, серосодержащих и углеводородных растворов и эманаций в переносе и отложении Ni, Zn, Cu, Cr и V в виде сульфидов. В работе [3] особо подчеркнуто присутствие в составе рудных и жильных минералов, в том числе сульванита и патронита, включений воды, CO_2 , сероводорода, а в флюорите — дополнительно больших количеств углеводородов. Это перекликается с наличием в кальците из дайки в Светлинском карьере микропор (рис. 3) с серой и сильным запахом сероводорода, возникающим при дроблении этих пород. Вероятно, сульфидная минерализация в кварц-карбонатных жилах среди извест-



няков на Пай-Хое [3] и в карбонатах Светлинского месторождения на Южном Урале возникла при участии перечисленных выше летучих компонентов.

Заключение

Приведенные выше данные о находках в дайке доломит-кальцитовых карбонатитов в карьере Светлинского месторождения редких сульфидов Ni, Zn, Cu, Cr и V подчеркивают специфику состава этих нетривиальных для Урала карбонатитов и других жильных пород. Дополнен список найденных в них прежде акцессориев: фторфлогопита, ванадий- и хромсодержащих тремолита, паргасита, мусковита, рутила, титанита и турмалина, благородной шпинели, корунда, пирита, уранинита и мухинита. Все эти минералы неравномерно распределены в карбонатной матрице породы, не будучи приуроченными к трещинным зонам, часто имеющими поверхности одновременного роста друг с другом и с окружающими карбонатами. Повсеместная обогащенность минералов-примесей в таких карбонатах фтором, хромом, ванадием и никелем может свидетельствовать об участии в их формировании флюидов ультраосновной-щелочной магмы. Этому способствовало наличие в них углекислоты и сероводорода.

Литература

1. Азовскова О. Б., Главатских С. П. Хромовые сульфопинели ряда «калининит — флоренсовит» — первые находки на Урале // Вестник Уральского отделения РМО. 2013. № 10. С. 5—8.
2. Иванов О. К., Филиппов В. Н. Калининит $ZnCr_2S_4$ и эсכולаит из эндоконтакта карбонатитов Косвинского камня на Урале // Урал. геол. журн. 2012. № 3 (87). С. 43—48.
3. Ковальчук Н. С., Макеев А. Б. Типоморфизм и парастерезис юшкинита (Пайхойский антиклинорий) // Записки РМО. 2007. Часть 136, Вып. 5. С. 1—21.
4. Кориневский В. Г. Ваэсит (NiS_2) — первая находка в карбонатах // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 5. С. 13—19.
5. Макеев А. Б., Ковальчук Н. С. Юшкинит $V_{1-x}S \cdot n[(Mg,Al)(OH)_2]$. Сыктывкар: Геопринт, 2006. 70 с.
6. Попов В. А. К реинтерпретации генезиса тел карбонатных пород на юго-западном побережье озера Байкал // Урал. минералог. сб. № 9. Миасс: ИМин УрО РАН, 1999. С. 102—108.
7. Попов В. А., Колисниченко С. В. К минералогии карбонатитов Русской Бразилии на Южном Урале // Урал. минералог. сб. № 15. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. С. 75—84.
8. Резницкий Л. З., Скляров Е. В., Ушаповская З. Ф. Калининит $ZnCr_2S_4$ — новая природная сульфопинель // Записки ВМО. 1985. Часть 114. Вып. 5. С. 622—627.
9. Biagioni, C., Orlandi, P., Camarda, S., Chinellato, M., Appiani, R., Del Chiaro, L., and Sanguineti, G. Minerals from marbles of Carrara and the Apuan Alps. Vicchio (Firenze): LoGisma editore, 2019, 144 p.
10. Locock A. J. An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations // Computers & Geosciences. 2014. V. 62. pp. 1—11.
11. Morino, A., and Passarino, G.. Minerali nel marmo di Carrara: solfuri e solfosali // Rivista Mineralogica Italiana. 2016. V. 40. No 1. pp. 22—33.
12. Vakh A. E., Moiseenko V. G., Stepanov V. A., and Avchenko O. V. The Berezitovy gold-base metal deposit // Doklady Earth Sciences. 2009. V. 425. No 1. pp. 253—255.
13. www.handbookofmineralogy.com
14. www.webmineral.com

References

1. Azovskova O., Glavatskikh S. P. *Khomovye sulfospineli ryada kalininit-florensovit — pervye nakhodki na Urale* (Chromium sulfospinel of a number of kalininite-florensovit — the first finds in the Urals). Proceedings of RMS, No. 10, Yekaterinburg: IGG UBR RAS, 2013, pp. 5—8.
2. Ivanov O. K., Filippov V. N. *Kalininit — $ZnCr_2S_4$ i eskolait iz endokontakta karbonatitov Kos'vinskogo kamnya na Urale* (Kalininite — $ZnCr_2S_4$ and escolait from the endocontact of the carbonatites of the Kosvinsky stone in the Urals). Ural. geol. zhurn., 2012, No 3(87), pp. 43—48.
3. Koval'chuk N. S., Makeev A. B. *Tipomorfizm i parasterezis yushkinita (Paikhoiskiy antiklinoriy)* (Typomorphism and parasteresis of yushkinite (Pay-Khoy anticlinorium)). Proceedings of RMS, 2007, part 136, Issue 5, pp. 1—21.
4. Korinevsky V. G.. *Vaesit (NiS_2) — pervaya nakhodka v karbonatitakh* (Vaesite (NiS_2) — the first find in carbonatites). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2019. No. 5, pp. 13—19.
5. Makeev A. B. Koval'chuk N. S. *Yushkinite $V_{1-x}S \cdot n[(Mg,Al)(OH)_2]$* (Yushkinite $V_{1-x}S \cdot n[(Mg,Al)(OH)_2]$). Syktyvkar: Geoprint, 2006, 70 p.
6. Popov V. A. *K interpretatsii genezisa tel karbonatnykh porod na yugo-zapadnom poberezh'e ozera Baikal* (To reinterpretation of the genesis of bodies of carbonate rocks on the southwestern coast of Lake Baikal). Ural. mineralog. sb. No 9. Miass: IMin UB RAS, 1999, pp. 102—108.
7. Popov V. A., Kolisnichenko S. V. *K mineralogii karbonatitov Russkoy Brazili na Uzhnom Urale* (To the mineralogy of carbonatites of Russian Brazil in the Southern Urals) Ural. mineralog. Sb. No 15. Miass: IMin UB RAS, 2008, pp. 75—84.
8. Reznitskiy L. Z., Sklyarov E. V., Ushchapovskaya Z. F. *Kalininit $ZnCr_2S_4$ — novaya prirodnaya sulfospinel* (Kalininite $ZnCr_2S_4$ — a new natural sulfonospinel). Proceedings of RMS, 1985, part 114, Issue 5, pp. 622—627.
9. Biagioni C., Orlandi P., Camarda S., Chinellato M., Appiani R., Del Chiaro L., and Sanguineti G. Minerals from marbles of Carrara and the Apuan Alps. Vicchio (Firenze): LoGisma editore, 2019, 144 p.
10. Locock A. J. An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations. Computers & Geosciences, 2014, V. 62, pp. 1—11.
11. Morino A., and Passarino G.. Minerali nel marmo di Carrara: solfuri e solfosali. Rivista Mineralogica Italiana, 2016, V. 40, No 1, pp. 22—33.
12. Vakh A. E., Moiseenko V. G., Stepanov V. A., and Avchenko O. V. The Berezitovy gold-base metal deposit. Doklady Earth Sciences, 2009, V. 425, No 1, pp. 253—255.
13. www.handbookofmineralogy.com
14. www.webmineral.com



ГРАНИТОИДЫ НЯРТИНСКОГО БЛОКА (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ): НОВЫЕ ДАННЫЕ

О. В. Удоратина^{1,2}, М. А. Кобл³, А. С. Шуйский¹, В. А. Капитанова¹

¹ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; udoratina@geo.komisc.ru

²ТГУ, ³Стэнфордский Университет, США

Установлен возраст (U-Pb, SIMS), особенности распределения R3Э, Ti, Hf, Y в цирконах гранитоидов няртинского блока (Приполярный Урал), впервые получены изотопно-геохимические данные (O, Lu-Hf), позволяющие установить изотопно-геохимические характеристики протолита пород. Обнаружены две возрастные группы цирконов отличающиеся своим возрастом, геохимическими (распределение R3Э), термическими (t^* кристаллизации), изотопными (Lu-Hf) характеристиками, а также расчетными модельными возрастами протолитов. Цирконы с возрастом 619 млн лет кристаллизовались при температуре 702–684 °C, имеют корово-мантийные значения изотопного состава гафния (–2.09–+1.76) и модельный возраст протолита T_{DM2} 1.48–1.29 млрд лет. Цирконы с возрастом 517 млн лет формировались при температуре 795–737 °C, имеют коровые характеристики изотопного состава гафния (+3.58–+5.16) и модельный возраст протолита T_{DM2} 1.03–1.11 млрд лет. Полученные данные подтверждают, что процессы гранитизации в центральной части няртинского блока проявлялись неоднократно ~620 и ~520 млн лет.

Ключевые слова: S-граниты, цирконы, U-Pb (SIMS), изотопно-геохимические характеристики, Приполярный Урал.

GRANITOIDS OF THE NYARTA BLOCK (SUBPOLAR URALS): NEW DATA

O. V. Udoratina^{1,2}, M. A. Coble³, A. S. Shuyskiy¹, V. A. Kapitanova¹

¹Institute of Geology of Komi SC UB RAS

²TSU, ³Stanford University, USA

The age (U-Pb, SIMS), features of the distribution of REE, Ti, Hf, Y in zircons of granitoids of the Nartablock (Subpolar Urals) were established, isotope-geochemical data (O, Lu-Hf) were obtained for the first time, allowing to establish the isotope-geochemical characteristics of protolith rocks. Two age groups of zircons were found that differ in their age, geochemical (REE distribution), thermal (t^* crystallization), isotopic (Lu-Hf) characteristics, as well as the estimated model ages of protoliths. Zircons with an age of 619 Ma crystallized at a temperature of 702–684 °C, have a crust-mantle hafnium isotopic composition (–2.09–+1.76) and a model age of protolith TDM2 1.48–1.29 Ga. Zircons with an age of 517 Ma were formed at a temperature of 795–737 °C, have crustal characteristics of the hafnium isotopic composition (+3.58–+5.16) and the model age of the protolith TDM2 is 1.03–1.11 Ga. The data obtained confirm that granitization processes in the central part of the Nyartablock manifested themselves repeatedly ~620 and ~520 Ma.

Keywords: S-granites, zircons, U-Pb (SIMS), isotope-geochemical characteristics, Subpolar Urals.

Introduction

In the Subpolar Urals, the central part of the Lyapinsky anticlinorium (Khobeiz anticline, Nyarta block) is composed of highly metamorphic rocks and granitoid massifs developed among them.

The metamorphic gneisses and amphibole crystalline schists enclosing granitoids are considered in the rank of the Nyarta complex of the Proterozoic age [11–14 and links in these publications], Nyarta suite of the Early Riphean age according to other authors of the [4–5]. The entire volume of rocks of the Nyarta complex (suite) is composed of high-temperature zones allocated to the Upper Kozhim metamorphic complex; it is assumed that all the main events of the metamorphic process (progressive phase) are limited in time by the Vendian [5]. The complex is divided into sub-complexes: 1. gneiss-amphibolite-crystalline shale, corresponding to the field of epidote-amphibolite facies, and 2. metabasite-mica-shale, corresponding to the field of development of high-temperature subfacies of green-shale facies. The previously occurred metamorphism of the amphibolite facies is reconstructed.

Massifs of granite gneisses and moderately alkaline leucogranites developed among these metamorphic formations are considered by some authors as part of the Nikolayshor granite gneiss complex [9, 12–14], by others as part of the first phase of the Salner-Manhambov complex [4–5].

Autochthonous and parautochthonous granites are formed during granitization and subsequent melting of a

substrate of a heterogeneous composition. They are found in the area of migmatites.

Granite massifs, developed among these rocks (Nikolayshorsky, Bazisny, Ambashorsky, Halmeryusky, Palnikshorsky, Mansaranizsky, Zapadnosvobodnensky, Lavkashorsky, Svobodnensky, Balashovsky, Ustnyartinsky) are considered as melted on-site or slightly displaced small granite bodies with transitional zones between the granite and host metamorphites (Fig. 1, a).

Recent isotope-geochemical studies show that the bulk of granite massifs inherit zircons from the substrate, which confirms the minimum degree of melting. The currently known ages of zircons of the substrate involved in melting vary in a wide range from 2127 to 327 Ma, however, the bulk of granite massifs was melted during the Timan collision [3, 12 and links in these publications]. It was previously shown that under these conditions granitoids were formed with various geochemical and isotope-geochemical characteristics corresponding to S, I, and A types of granites [15].

Characteristics of granitoids of the Nicholashorsky petrotypical massif are known because of many years of geological survey and thematic studies [4–5, 9–11, 17]. New data relate mainly to detailed mineralogical studies and the isotope-geochemical characteristics of granitoids, as well as the analysis of accumulated data [1–3, 7–8, 10–13, 16].

Geochronological studies of granitoids and granitized rocks began long ago and went from the first dat-

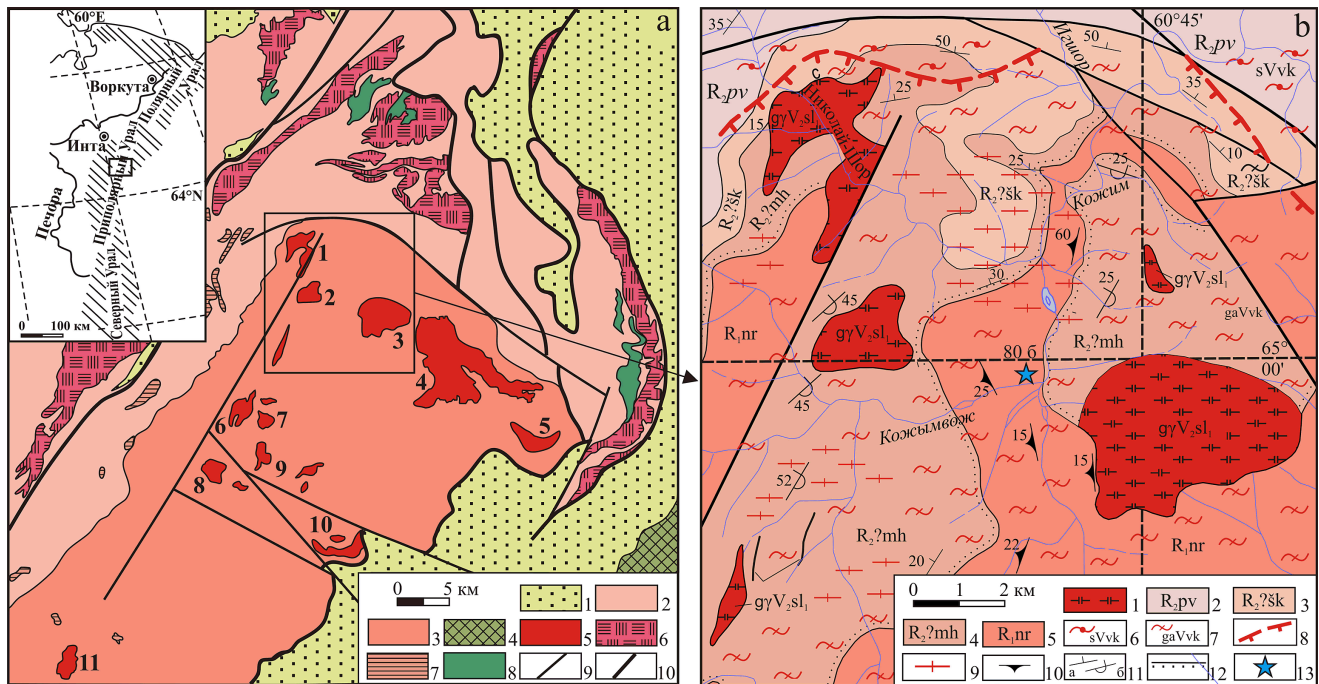


Рис. 1. а) Схема размещения гранитоидных массивов ядра Хобеизской антиклинали. 1 — образования Западно-Уральской мегазоны; 2–3 — образования Центрально-Уральской мегазоны: 2 — среднего рифея-венда, 3 — нижнего-среднего рифея (ядро Хобеизской антиклинали); 4 — комплексы Тагильской мегазоны; 5 — гранитоидные массивы ядра Хобеизской антиклинали; 6–8 — интрузивные комплексы позднего рифея-кембрия в обрамлении ядра Хобеизской антиклинали: 6 — сальнерско-маньхамбовский, 7 — панэчаизский, 8 — парнукский; 9 — разломы; 10 — надвиги. Цифрами на схеме обозначены массивы: 1 — Николайшорский, 2 — Базисный, 3 — Амбаршорский, 4 — Хальмерьюский, 5 — Пальникшорский, 6 — Мансараниский, 7 — Западновободненский, 8 — Лавкашорский, 9 — Свободненский (выделен пунктирной рамкой), 10 — Балашовский, 11 — Устьняртинский. б) Геологическая карта северного обрамления няртинского гнейсо-мигматитового комплекса (по [5]). б) 1 — сальнерско-маньхамбовский комплекс гранит-лейкогранитовый (γ - $l\gamma V_2$ - E_{sl}) (гнейсо-граниты); 2 — пуйвинская свита (R_{2pv}); 3 — шокуринская свита ($R_{2?sk}$); 4 — маньхобейнская свита ($R_{2?mh}$); 5 — няртинская свита (R_{1nr}); верхнекожимский метаморфический комплекс (Vvk): фации регионального метаморфизма: 6 — зеленосланцевая (метабазит-слюдяносланцевый «подкомплекс» sVvk), 7 — эпидот-амфиболитовая (гнейсо-амфиболит-кристаллосланцевый «подкомплекс» gaVvk); 8 — граница метаморфических фаций и субфаций; 9 — гранитизированные породы; 10 — элементы залегания метаморфической и кристаллизационной сланцеватости; 11 — элементы залегания слоистости: а — наклонного, б — опрокинутого; 12 — несогласное залегание; 13 — точка отбора (обр. 80б)

Рис. 1. а) Layout of granitoid massifs of the core of the Khibeiz anticline. 1 — formations of the West Ural megazones; 2–3 — formations of the Central Ural megazone: 2 — Middle Riphean-Wenda, 3 — Lower-Middle Riphean (core of the Khibeiz anticline); 4 — Tagil megazone complexes; 5 — granitoid massifs of the core of the Khibeiz anticline; 6–8 — intrusive complexes of the Late Riphean-Cambrian framed by the core of the Khibeiz anticline: 6 — Salnier-Manhambov, 7 — Panechaiz, 8 — Parnuk; 9 — faults; 10 — thrusts. The numbers on the diagram indicate the arrays: 1 — Nikolayshorsky, 2 — Basisny, 3 — Ambarsorsky, 4 — Halmeryusky, 5 — Palnikshorsky, 6 — Mansaranizsky, 7 — Zapadnosvobodnensky, 8 — Lavkashorsky, 9 — Svobodnensky (highlighted with a dashed frame), 10 — Balashov, 11 — Ustnartinsky. б) Geological map of the northern frame of the Nyarta gneiss-migmatite complex (according to [5]). б) 1 — Salnier-Manhambov granite-leucogranite complex (γ - $l\gamma V_2$ - E_{sl}) (gneiss-granites); 2 — Puyvinskaya Suite (R_{2pv}); 3 — Shchokurinskaya Suite ($R_{2?sk}$); 4 — manhobeinskaya suite ($R_{2?mh}$); 5 — Nyarta Suite (R_{1nr}); Upper Kozhinsky metamorphic complex (Vvk): facies of regional metamorphism: 6 — green shale (metabasite-mica shale “subcomplex” sVvk), 7 — epidote-amphibolite (gneiss-amphibolite-crystal-shale “subcomplex” gaVvk); 8 — border of metamorphic facies and subfacies; 9 — granitized rocks; 10 — elements of occurrence of metamorphic and crystallization schists; 11 — elements of bedding: a — inclined, b — overturned; 12 — dissonant bedding; 13 — sampling point (sample 80b)

ing of K-Ar, Rb-Sr, Pb-Pb methods, highlighted the main stages of granite formation in this region based on them for a long time [2]. Based on the ages established in recent years for some U-Pb zircon massifs (SIMS): (Halmeryusky (638 ± 6 , $n = 10$), Ambashorsky (520 ± 7 , $n = 9$), Lavkashorsky (327 ± 3 , $n = 2$; 489 ± 6 , $n = 1$; 560 ± 4 , $n = 3$; 1756 ± 19 , $n = 1$), Svobodnensky (476 ± 11 , $n = 5$; 553 ± 8 , $n = 3$), it is shown that granite formation processes in the core of the Khibeiz anticline (in the rocks of the Nyarta complex (suite)) occurred repeatedly. Some of the zircons, as we believe, are inherited, some reflect the time of formation of the melt, and some subsequent processes, often of all ages (inherited, magmatic stage and transformation stage) can be seen in one zircon crystal [3–5].

The age of granitoids of the petrotypical Nikolayshorsky massif established by the U-Pb (SIMS) method is 640 ± 6.7 [3], 606 ± 3 [14] and correlates geochronologically with the granites of the Salnier-Manhambov complex developed in the frame of the Nyarta block.

The new isotope-geochronological data on granitized rocks, composing the volume of the Nyarta block, allows us to determine the isotope-geochemical features of melting protoliths and the crystallization temperatures and the age of granitization processes more accurately.

Methods

The studies were carried out at the CCU “Geoscience”, IG Komi SC UB RAS (Syktyvkar): petrographic, micro-



probe, and chemical (classical method). The content of rare, scattered, and rare-earth elements were measured at the Geochemistry Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow) using neutron activation methods and X-ray radiometric methods. Zircon ages were determined using the U-Pb, SIMS method at Stanford University, USA, the research technique is given in [26]. The oxygen isotope composition in zircons was determined at the GIN SB RAS (Ulan-Ude) according to the technique described in [6]. The hafnium isotopic composition was determined by the authors at the Institute of Geology and Mineral Resources (Tianjin, China) according to the [21].

Results and discussion

In the upper reaches of the Kozhim River, where the most complete section of the rocks of the Nyarta complex (suite) is revealed, samples were taken for research (the left

side of the Kozhim-Vozh stream at the confluence with the Kozhim river). Here (65°00'13''; 60°41'32'') in the rocky outcrop, alternating thicknesses of crystalline schists with granite rocks are observed — the zone of migmatization of the western contact of the Ambashora massif is exposed (Fig. 1, b, a fragment of the geological map of the last generation is given).

The tested rocks are represented by white-gray colored medium-grained gneiss-shaped albitized granite. Mineralogical composition (vol %): Plagioclase (albite) — 30–40, quartz — 40–50, feldspar (microcline) — 25–30, muscovite (up to 3). Accessory minerals: zircon, garnet, allanite, titanite, secondary — sericite, calcite, ore — pyrite. In thin sections lepidogranoblast microstructures with the rarely development of garnet porphyroblast are observed.

According to the Petrographic Code, rocks are classified as acid plutonic normal alkaline rocks (Fig. 2, a). The silica content (wt %) is 77, alumina 13.2, sodium ox-

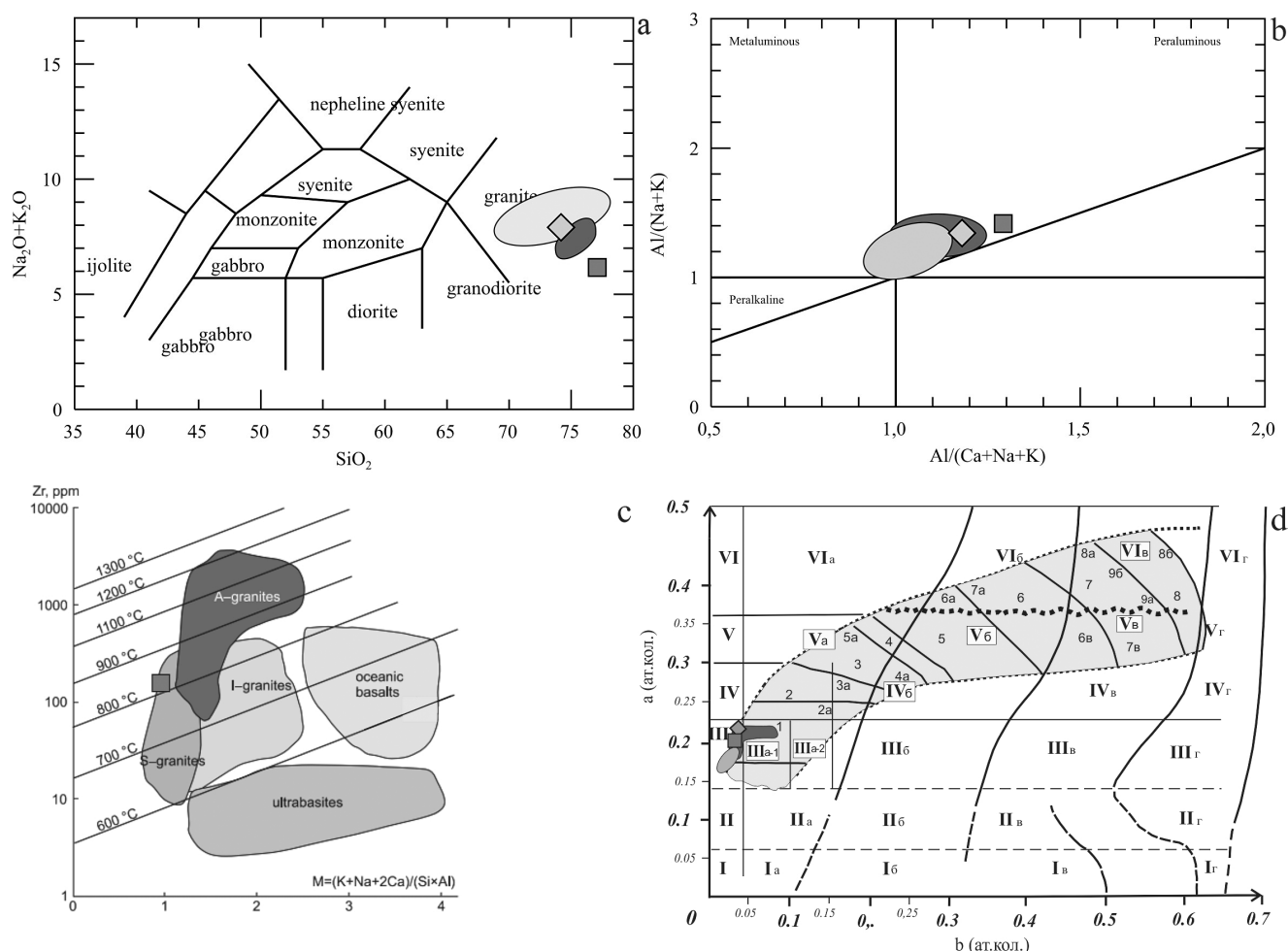


Рис. 2. Диаграммы $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ (a), $\text{Al}/(\text{Na} + \text{K})/\text{Al}(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ — b, Концентрации насыщения цирконием расплавов разного состава (параметр M) и генезиса при различных температурах по [25], экспериментальные данные — по [24] — c, диаграмма a-b для реконструкции первичного состава метаматматических пород по А.Н. Неелову — d. Квадрат — положение точки состава пробы 80б. Нанесены для сравнения: эллипсы — точки составов пород петротипичного Николайшорского массива взятые из работ [7] (темно серое поле) и неопубликованные данные А.А.Соболевой — серое поле, а также нанесена точка среднего состава гранитоидов Амбашорского массива (ромб) [5]

Fig. 2. Diagrams $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ (a) and $\text{Al}/(\text{Na} + \text{K})/\text{Al}(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ (b), The zirconium saturation concentrations of the melts of different composition (parameter M) and origin at different temperatures [25]. Experimental data after [24] (c), diagram a-b for reconstruction of the primary composition of metamagmatic rocks according to A.N. Neyelov (d) The square is the position of the sample composition point 80b. Ellipses, rock composition points of the Nikolayshorsky massif taken from the works [7] (dark gray field) and unpublished data by A.A.Soboleva — gray field as well as a point of the average composition of granitoids of the Ambashora massif (rhombus) [5]

ide 4.72, potassium oxide 1.44. The rocks are characterized by a significant predominance of Na_2O over K_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 3.28$). The rocks with an agpaity index (0.71), an alumina index ASI (1.29) and an alumina index ($\text{al}' = 5.9$) are related to those with a high alumina index. The position of the composition point in the diagram $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K}) - \text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$, indicates a significant contribution of crustal (sedimentary) material to the melting substrate (Fig. 2, b), as well as the location of the composition point on the Zr-M diagram (Fig. 2, c). According to the petro-geochemical characteristics of the rocks are S type granites. Our data confirm earlier works, where it was shown that, in their petro-geochemical characteristics, the granites of the central part of the Nyarta block were comparable with S-type granites [3, 10, 15].

On the diagram for reconstructing the paleosubstratum (N. Neelova), the composition point falls into the uncertainty field of arkosis and rhyolite (Fig. 2, d). Based only on chemical composition data, it is impossible to distinguish highly metamorphosed volcanics and terrigenous sediments — arkoses.

The REE in rock content is 324.72 g/t; a slight predominance of light REE over heavy ($\text{La}_N/\text{Yb}_N = 9.46$) and a clearly seen Eu minimum ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.38$) are observed at the REE distribution spectra (Fig. 3, a). On the multi-element diagrams the large cationic elements predominate over highly charged elements (Fig. 3, b). For comparison, the profiles of the spectra of granitoids of the Nikolayshorsk petrotypical massif are plotted on the charts; unfortunately, there are no data for the rocks of the Ambarshor massif. As can be seen in the studied rocks there are no negative anomalies (Ta, Nb, P, Eu) characteristic of the rocks of the petrotypical massif.

Zircons selected for research (sample 80b) are represented by small light yellow transparent grains saturated with inclusions. There are (1) wide-prismatic (tabular) with a well-developed prism and undeveloped pyramids crystals (150—100 μm , Ku 1:2), as well as (2) long-prismatic crystals with well-defined heads (100 μm , Ku 1:3).

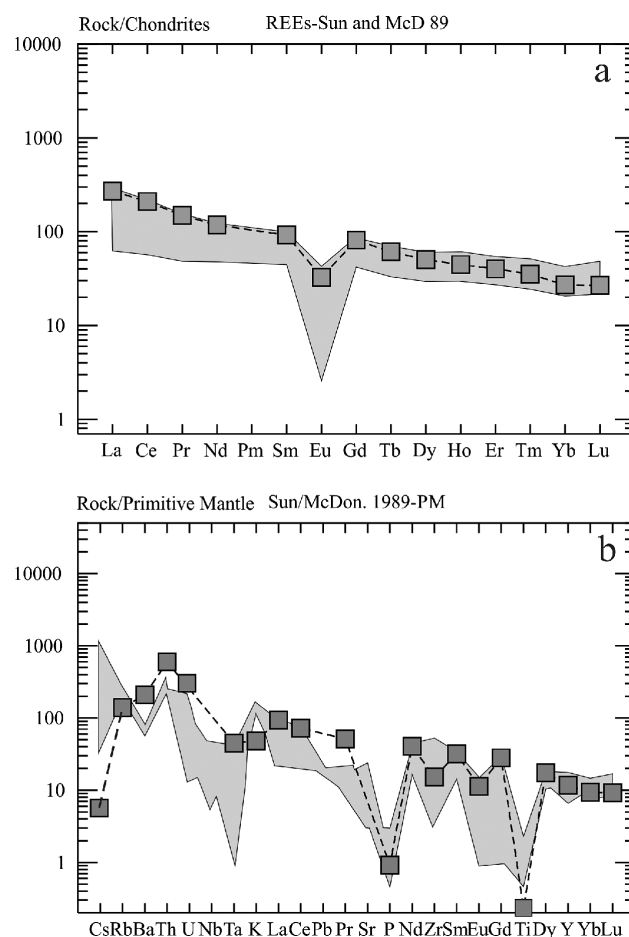


Рис. 3. Распределение РЗЭ (а) и мультиэлементная диаграмма (б) в породах. Серое поле неопубликованные данные А. А. Соболевой

Fig. 3. Distribution of REE (a) and Multi-element diagram (b) in the rocks. Gray field unpublished data by A. A. Soboleva

Таблица 1. Химический состав (мас. %), содержание элементов примесей (г/т) и индикаторные отношения в породе

Table 1. Chemical composition (wt. %), content of elements (ppm) and characteristic ratios of the rock

Химический состав / Chemical composition												
806	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	ППП
	77.11	0.001	13.17	1.07	1.07	0.03	0.2	0.5	4.72	1.44	0.02	0.21
Индикаторные отношения / Indicative ratios												
806	ASI	Ga/Al	K/Rb	а.и.	Kф	al'	Fe*	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	Eu/Eu*	S
	1.29	1.86	135.2	0.7	0.91	5.9	0.8	6.2	3.28	9.5	0.4	324.7
Элементы / Elements												
806	Sr	Rb	Ba	Ta	Hf	Ga	Zr*	Nb*	Y*	La	Ce	Pr
	-	88.4	1165	1.83	9.72	13	230	90	100	64.4	128	14.2
	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Cs
	55	14.1	1.9	16.7	2.28	12.8	2.52	6.65	0.9	4.59	0.68	0.044
	Sc	Cr	Co	Ni	Zn	Se	As	Sb	Th	U	Br	Au
	4.61	21.2	1.06	-	270	5.65	26.4	1.25	20.8	6.65	0.62	-

Примечание: * — элементы определены рентгено-радиометрическим методом, остальные методом нейтронной активации. «—» ниже предела обнаружения, Fe* — железистость ($\text{FeO}_{\text{tot}}/(\text{FeO}_{\text{tot}} + \text{MgO})$), а.и. — агпайтовый индекс ($\text{Na} + \text{K}/\text{Al}$), ASI — $[\text{Al}/\text{Ca} - 1.67\text{P} + \text{Na} + \text{K}]$, Kф = $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, al' = $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$.

Note: * — the elements are determined by the X-ray radiometric method, the rest by neutron activation. «—» below detection limit, Fe* — iron index ($\text{FeO}_{\text{tot}}/(\text{FeO}_{\text{tot}} + \text{MgO})$), a.i. — agpaitindex ($\text{Na} + \text{K}/\text{Al}$), ASI — $[\text{Al}/\text{Ca} - 1.67\text{P} + \text{Na} + \text{K}]$, Kф = $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, al' = $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$.

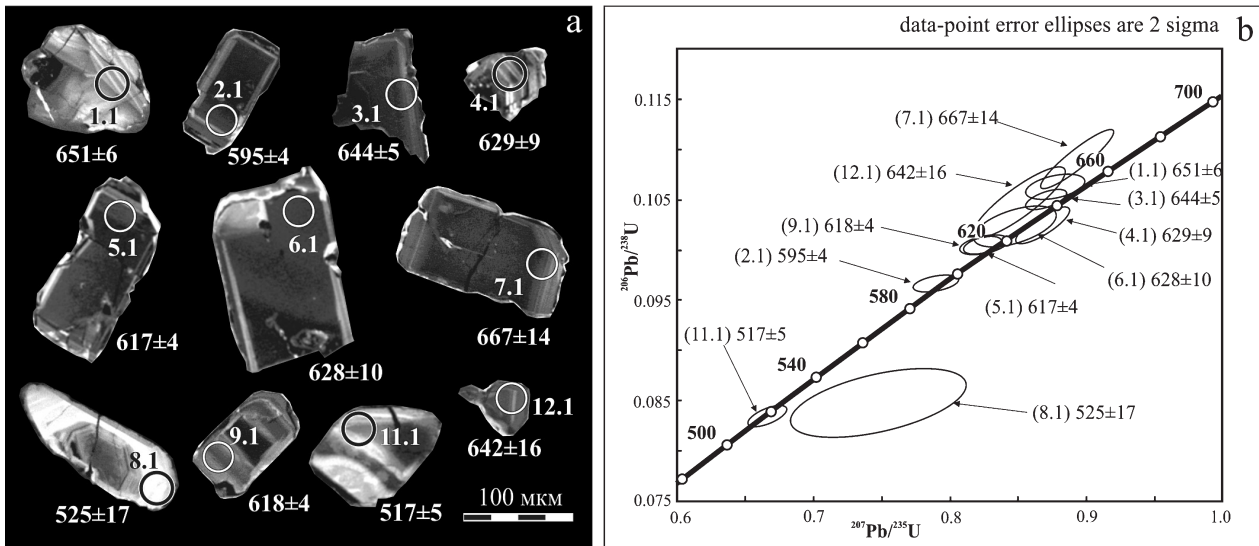


Рис. 4. а — катодолуминесцентные изображения цирконов из гранитов (проба 80В) с номерами датированных зерен, аналитическими кратерами, возрастом, б — конкордия, конкордантный возраст 619 ± 5.4 , СКВО 1.4, $n = 5$

Fig. 4. Cathodoluminescence image of zircon from granites (80B) numbers dating grains and analysis of craters (a); Diagram for zircon 80B — (b). The coordinates of points — the center of the ellipse of error (2σ). Concordant age for coherent groups of 5 definitions — 619 ± 5.4 million years (2σ, MSWD = 1.4)

In reflected light, the crystal surface is smooth. In the cathodoluminescent images of the group (1) a wide black central zone (often fractured) and a narrow border with growth zonality (Fig. 4, a) is seen; crystals of the second group are characterized by lighter, gray tones of the central parts and white edge zones. The surface of the crystals is smooth in reflected light. According to their morphology, zircons belong to the 4th type identified by Yu. I. Pystina [12], typical of the amphibolite facies (for migmatites), their formation is associated with the presence of a silicate melt, i. e. in fact, they are magmatic zircons [12].

U-Pb zircon age at 11 points was determined (Table 2). We divided zircons in two age groups, the points 1.1, 2.1, 3.1, 7.1 were removed from the calculation. The age range was 1) 642–617 (4.1, 5.1, 6.1, 9.1, 12.1, concordant 619 ± 5.4 Ma, MSWD = 1.4); 2) 525–517 (11.1, 8.1 — 517.6 ± 10.2 Ma, MSWD = 0.05) Ma (Fig. 4, b).

The data, obtained for the first group of zircons, are close to the age of the petrotypical Nikolayshorsk massif (640 ± 6.7 , 606 ± 3 Ma), and the age of zircons of the second group is close to the age of granites of the Ambashor massif (520 ± 7 Ma) in the frame of which a sample was taken.

The contents (g/t) of U vary from 210 to 320, Th from 100 to 190 in the first group and from 35 to 235 and 25 to 160, respectively, in the second. The contents of impurity elements in zircons of different age groups differ, which confirms that zircons belong to different generations (Table 3, Fig. 5 a). On the diagrams U/Yb — Y and U/Yb-Hf zircons, points fall into the field of derivatives of the continental crust (Fig. 5 b-c).

The model crystallization temperature calculated from the titanium content [24] is in the range of 702–684 °C for the first group and in the range of 795–737 °C

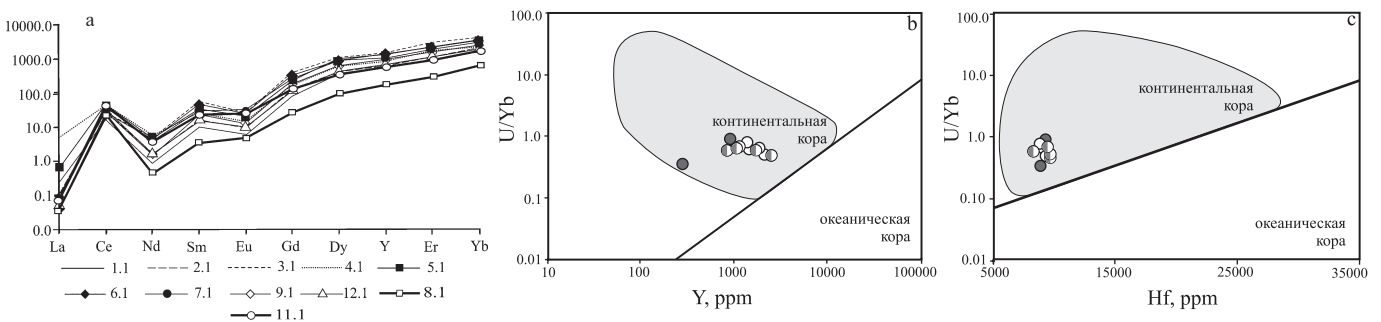


Рис. 5. А-спектры распределения РЗЭ (нормированные на хондрит) в цирконах, жирные линии — точки возрастных значений (525–517 млн лет). (b–c) диаграммы Y — U/Yb и Hf — U/Yb для цирконов поля по [23]. Незакрашенный шар — значения для точек 4.1, 5.1, 6.1, 9.1 (619 ± 5.4), закрашенный шар — точки 8.1, 11.1 (517.6 ± 10.2), полужакрашенный шар — остальные значения

Fig. 5. REE distribution spectra (normalized to chondrite) in zircons (a), bold lines — points of age values (525–517 Ma). (b–c) Y — U/Yb and Hf — U/Yb diagrams for zircon. Fields after [23]. Unfilled ball — values for points 4.1, 5.1, 6.1, 9.1 (619 ± 5.4), filled ball — points 8.1, 11.1 (517.6 ± 10.2), half-filled ball — other values

Таблица 2. Результаты U—Pb изотопных исследований цирконов

Table. 2. Results of U—Pb isotope studies of zircons

Зерно. кратер Grain	$^{206}\text{Pb}_c$, %	Содержания, мкг Contents, mkg			$^{232}\text{Th}/$ ^{238}U	Возраст, млн лет, $\pm$ Age, Ma, $\pm$		D. %	Изотопные отношения, $\pm$ Isotope ratios, $\pm$			Rh _o
		$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
11.1	0.02	17	237	161	0.70	517 $\pm$ 5	523 $\pm$ 30	+1	0.0578 $\pm$ 1.4	0.67 $\pm$ 1.7	0.084 $\pm$ 1.0	0.6
8.1	0.03	3	35	23	0.66	525 $\pm$ 17	737 $\pm$ 128	+30	0.0639 $\pm$ 6.0	0.75 $\pm$ 6.9	0.085 $\pm$ 3.4	0.5
2.1	0.04	18	219	87	0.41	595 $\pm$ 4	573 $\pm$ 34	−4	0.0592 $\pm$ 1.6	0.79 $\pm$ 1.7	0.097 $\pm$ 0.7	0.4
5.1	−0.01	28	319	187	0.61	617 $\pm$ 4	578 $\pm$ 29	−7	0.0593 $\pm$ 1.3	0.82 $\pm$ 1.5	0.101 $\pm$ 0.7	0.5
9.1	−0.07	19	222	111	0.51	618 $\pm$ 4	588 $\pm$ 31	−5	0.0596 $\pm$ 1.4	0.83 $\pm$ 1.6	0.101 $\pm$ 0.8	0.5
6.1	0.01	24	269	160	0.61	628 $\pm$ 10	605 $\pm$ 51	−4	0.0601 $\pm$ 2.3	0.85 $\pm$ 2.9	0.102 $\pm$ 1.6	0.6
4.1	0.08	25	289	168	0.60	629 $\pm$ 9	651 $\pm$ 23	+4	0.0614 $\pm$ 1.1	0.87 $\pm$ 1.8	0.103 $\pm$ 1.5	0.8
12.1	−0.17	19	213	98	0.48	642 $\pm$ 16	563 $\pm$ 34	−15	0.0589 $\pm$ 1.5	0.85 $\pm$ 3.1	0.105 $\pm$ 2.7	0.9
3.1	−0.16	26	291	187	0.66	644 $\pm$ 5	606 $\pm$ 24	−7	0.0601 $\pm$ 1.1	0.87 $\pm$ 1.4	0.105 $\pm$ 0.8	0.6
1.1	−0.25	13	139	48	0.36	651 $\pm$ 6	597 $\pm$ 40	−10	0.0599 $\pm$ 1.8	0.88 $\pm$ 2.0	0.106 $\pm$ 0.9	0.4
7.1	−0.30	25	268	178	0.69	667 $\pm$ 14	580 $\pm$ 23	−16	0.0594 $\pm$ 1.1	0.89 $\pm$ 2.4	0.109 $\pm$ 2.2	0.9

Примечание. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ — обыкновенный и радиогенный свинец. Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D — дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rh_o — коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Note. $^{206}\text{Pb}_c$ and $^{206}\text{Pb}^*$ — ordinary and radiogenic lead. The isotopic ratios and contents of ^{206}Pb are corrected for the measured ^{204}Pb . D — discordance: $D = 100 \times [\text{age } (^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}) / \text{age } (^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}) - 1]$. Rho is the correlation coefficient between errors in determining the isotopic ratios $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ and $^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$.

Таблица 3. Содержания иттрия, редкоземельных элементов, железа и титана (г/т) и температуры кристаллизации (°C) в исследованных цирконах

Table 3. Content of yttrium, rare earth elements, iron and titanium (ppm) and crystallization temperature (°C) in the studied zircons

Зерно / Grain	Y	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Hf	Fe	⁴⁸ Ti	⁴⁹ Ti	t° (1.0/0.7)
11.1	891	0.02	25	1.7	3.4	1.4	25	84	147	270	9338	55	4.4	4.2	737
8.1	276	0.01	13	0.2	0.5	0.26	5	24	48	103	8896	11	8.1	8	795
2.1	1056	0.03	16	0.8	2.3	0.56	26	105	182	344	9144	33	2.5	2.4	686
5.1	1860	0.16	28	2.1	4.8	1.12	48	200	330	505	9055	35	2.7	2.6	694
9.1	1436	0.02	19	0.8	3.1	0.76	35	143	248	378	9307	26	2.7	2.5	691
6.1	2095	0.01	16	2.2	6.4	1.42	61	222	355	551	9352	34	2.2	2.1	674
4.1	1355	1.14	23	2.4	3.7	0.88	35	145	243	381	8912	42	3	2.8	702
12.1	1120	0.01	16	0.8	2.5	0.63	27	115	199	326	9404	28	2.4	2.4	684
3.1	2467	0.02	17	2.3	7.1	1.59	72	274	431	636	9617	37	2.3	2.2	679
1.1	844	0.05	10	0.4	1.4	0.37	17	85	155	265	9577	25	2.2	2.1	676
7.1	1723	0.02	21	1.9	4.5	1.71	52	200	302	462	8326	32	3.9	4.0	726

Таблица 4. Изотопный состав Hf в цирконах

Table 4. Hf isotope composition of zircons

Зерно Grain	T(млн лет) T(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	T _{DM} (млрд лет) T(Ga)	f(Lu/Hf)	εHf(0)	εHf(t)	T _{DM2} (млрд лет) T(Ga)
1.1	653	0.018629	0.000061	0.00075	0.000003	0.282402	0.000018	1.193	-1	-13.081	0.91	1.35
2.1	596	0.029621	0.000042	0.00123	0.000002	0.282421	0.000018	1.182	-1	-12.425	0.15	1.34
3.1	645	0.051888	0.000153	0.00193	0.000002	0.282342	0.000018	1.317	-0.9	-15.214	-1.90	1.49
4.1	629	0.043429	0.000317	0.00167	0.000011	0.282452	0.000019	1.152	-0.9	-11.331	1.76	1.29
5.1	618	0.033111	0.000129	0.00128	0.000005	0.282389	0.000017	1.228	-1	-13.546	-0.52	1.40
6.1	629	0.042037	0.000361	0.00160	0.000013	0.282412	0.000018	1.206	-1	-12.744	0.38	1.36
7.1	669	0.043574	0.000099	0.00166	0.000004	0.282356	0.000020	1.287	-0.9	-14.696	-0.77	1.45
9.1	618	0.028904	0.000199	0.00112	0.000008	0.282343	0.000019	1.288	-1	-15.178	-2.09	1.48
8.1	525	0.066620	0.000284	0.00280	0.000032	0.282620	0.000026	0.94	-0.9	-5.3789	5.16	1.03
11.1	517	0.015132	0.000081	0.00061	0.000002	0.282559	0.000024	0.971	-1	-7.5437	3.58	1.11

Примечание:

$$\epsilon\text{Hf}(0) = (((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_S / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}) - 1) \times 1000;$$

$$\epsilon\text{Hf}(t) = (((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_S - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_S \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1))) - 1 \times 1000;$$

$$T_{\text{DM}} = 1 / \lambda \times \ln(1 + ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_S - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}) / ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_S - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}));$$

$$T_{\text{DM2}} = T_{\text{Hf}} - (T_{\text{Hf}} - t)(f_C - f_S / (f_C - f_{\text{DM}})); f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_S / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$$

где $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_S$ и $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_S$ измеренные значения в образце ($(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$ и $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$ $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ [19, 20]); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$ и $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ [22]), t — возраст кристаллизации циркона и $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ [18, 27]. T_{DM} — одностадийный возраст модели и T_{DM2} — двухстадийный возраст f_C, f_S, f_{DM} и $f_{\text{Lu/Hf}}$ значения корового источника, образца и деплетированной мантии, соответственно. В наших расчетах $f_C = -0.72$ (используя среднecоровую величину $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ [18]) и $f_{\text{DM}} = 0.16$ ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$) [21].

Note: where $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_S$ and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_S$ are the measured values of samples ($(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$ and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$ [19, 20]); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$ and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ [22]), t — is the crystallization age of the zircon, and $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{yr}^{-1}$ [18, 27]. T_{DM} and T_{DM2} are single-stage DM model and two-stage DM2 model ages, respectively. f_C, f_S , and f_{DM} are the $f_{\text{Lu/Hf}}$ values of the crustal source, the sample and the depleted mantle, respectively. In our calculations, $f_C = -0.72$ ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ in average continental crust) [18] and $f_{\text{DM}} = 0.16$ ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ [22]).

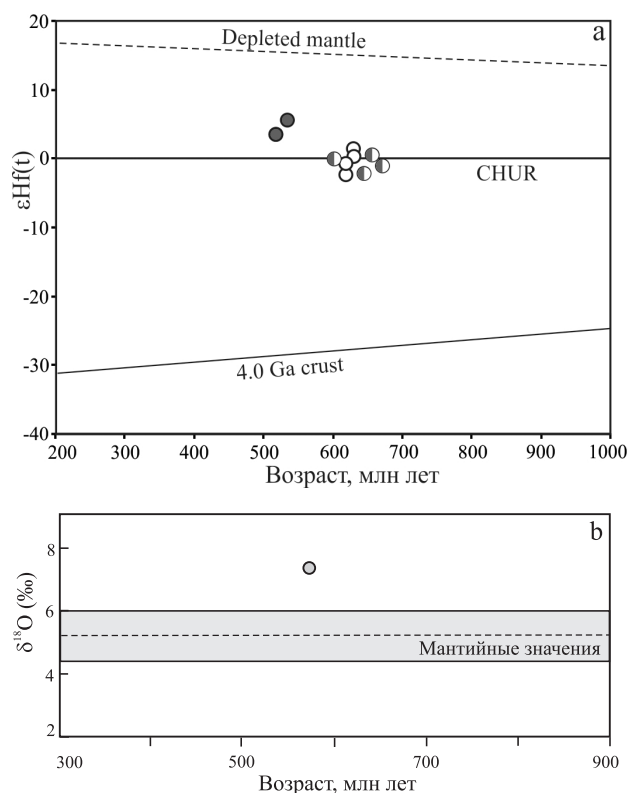


Рис. 6. Изотопный состав Hf (а) и О (b) в датированных цирконах. Условные обозначения на рис. 5

Fig. 6. The isotopic composition of Hf (a) and O (b) in the zircons dated. Legend in fig. 5

for the second (Table 3). The obtained rather low crystallization temperatures of zircons (characteristic of low-temperature magmatic zircons) are indirectly confirmed by the weak luminescence of the crystals of the first group in cathode rays. The temperature range obtained by saturation of the melt with zirconium shows higher temperatures (Fig. 2, c) of about 800 °C. The calculated temperatures, based on the study of crystal morphology close to our values, were obtained previously for zircons of granitoids of the petrotypical Nikolayshorsk massif 900—800, 700—650, 648—606, showing the complex history of the massif and the presence of zircons fixing various stages [7, 8]. The author of these works also determined low-temperature and higher-temperature zircons and made a conclusion about the repeated granitogenesis of the rocks.

The isotopic composition of hafnium in zircons of the first age group (point 4.1, 5.1, 6.1, 9.1, 12.1) varies from -2.09 to $+1.76$ and indicates a crust-mantle source, the model age of the protolith T_{DM2} is 1.48—1.29 Ga (Table 4, Fig. 6, a). The isotopic composition of hafnium in zircons of the second age group (point 8.1, 11.1) is $+3.58$ to $+5.16$, i. e. has mantle characteristics, the estimated model age of the protolith T_{DM2} is 1.03—1.11 Ga.

The oxygen isotopic composition ($\delta^{18}O$, ‰) of zircons has positive ($+7.31$) crust values (Fig. 6, b). High positive values of the oxygen isotopic composition are associated with the research method, since all oxygen of the zircon sample is burned out, and the hafnium isotopic composition was studied locally at the dated zircon points.

Conclusions

The gneiss-shaped granites of the central part of the Nyarta block, developed in the western frame of the Ambashora massif in the zone of development of migmatites, were studied. The rocks belong to S granites and are formed on primary sedimentary rocks, which is indicated by the mineral composition of the rock and petro-geochemical indices. Two age groups of zircons, 619 and 517 Ma, were found in the rocks. Zircons differ in their ages, geochemical (REE distribution), thermal (t° crystallization), isotopic (Hf) characteristics, as well as the estimated model ages of protoliths. The new data show that the granitization processes resulting in the studied rocks occurred in the central part of the Nyarta block in ~ 620 and ~ 520 Ma. The obtained time lines in the evolution of this part of the Subpolar Urals correlate with suprasubduction-accretion, collisional, syncollisional, and post-collisional processes (640—520) during which the formation of various types of granitoids, including S-granites, took place [1, 15]. We believe that zircons with an age of 619 ± 5.4 Ma are inherited from the previous melting process. The heating of the strata was stronger in a later period, therefore zircons of the second age group (517.6 ± 10.2 Ma) had higher crystallization temperatures. Either a partial entry of a deeper granite melt into this zone is possible, taking into account more mantle characteristics of these zircons and other model age of the source.

The authors are grateful to F. Mon and C. Gene (China Academy of Sciences, Beijing and the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China) for the opportunity to study the Lu-Hf zircon system.

The work is carried out according to No. GR AAAA-A17-117121270035-0, isotope (U-Pb, Lu-Hf) studies were carried out at the expense of financial resources of the project No. 18-5-5-46 "Evolution of the orogen Protouralid-Timanide according to geological, petrological, geochemical, and isotopic data".

Литература

1. Андрицев В. Л. Геохронология гранитоидного магматизма Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 11. С. 7—12.
2. Андрицев В. А. Изотопная геохронология доуралид Приполярного Урала. Сыктывкар, 1999. 48 с. (Научные доклады Коми научный центр УрО Российской академии наук; Вып. 413)
3. Возраст цирконов из гранитов ядра Хобеизского гранито-гнейсового купола (Полярный Урал) / А. А. Соболева, Н. А. Кузнецов, О. В. Удортатина и др. // Происхождение магматических пород: Мат-лы межд. (X Всерос.) петрограф. совещ. Апатиты: Кольский НЦ РАН. 2005. С. 236—238.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Листы Р-40 — Североуральск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2005. 332 с.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Северо-Уральская. Лист Q-41-XXV. Объяснительная записка / Под ред. М. А. Шишкина. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 252 с.
6. Демонтерова Е. И., Иванов А. В., Карманов Н. С., Палеский С. В., Посохов В. Ф. Неопротерозойские метатерригенные породы Северо-Муйской глыбы (Байкало-



Муйский пояс): новые данные по петрохимическому составу // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 10. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2012. Т. 1. С. 78–79.

7. Денисова Ю. В. Термометрия циркона из гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2016, № 12. С. 37–44.

8. Денисова Ю. В. Типоморфические и типохимические особенности акцессорных цирконов гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2014. № 5. С. 9–16.

9. Корреляция магматических комплексов европейского Северо-Востока СССР / В. Н. Охотников, В. И. Мизин, Л. Т. Белякова и др. Сыктывкар, 1985, 25с.

10. Махлаев Л. В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург. 1996. 150 с.

11. Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука 1994. 208 с.

12. Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Докембрий Приполярного Урала: хроностратиграфический аспект // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 2. С. 34–52.

13. Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 6. С. 25–38.

14. Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Новые данные о возрасте гранитоидов Приполярного Урала в связи с проблемой выделения кожимской среднерифейской гранит-риолитовой формации // Известия Коми научного центра УрО РАН. Выпуск 4(8). 2011. С. 73–78.

15. Соболева А. А., Удоратина О. В. Доуральские гранитоиды на Урале // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 9 (189). Вып. 2. С. 16–17.

16. Удоратина О. В., Капитанова В. А., Кобл М. А. Изотопные и геохронометрические системы в гранитоидах Николайшорского массива (Приполярный Урал): новые данные // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород: Мат-лы Росс. конф. по изотоп. геохронологии. М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 360–363.

17. Фишман М. В., Голдин Б. А. Гранитоиды Центральной части Приполярного Урала. Л.: Изд. АН СССР, 1963. 108 с.

18. Amelin, Y. Meteorite phosphates show constant ^{176}Lu decay rate since 4557 million years ago // Science. 2005. 310, 839–841.

19. Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., Pidgeon, R. T. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons // Nature. 1999. 399, 252–255.

20. Blichert-Toft J., Albarede F. The Lu–Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system // Earth and Planetary Science Letters. 1997. 148, 243–258.

21. Geng, J. Z., Li, H. K., Zhang, J., Zhou, H. Y., Li, H. M. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-ICP-MS // Geological Bulletin of China 30 (10). 2011, pp. 1508–1513 (in Chinese with English abstract)

22. Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., Jackson, S. E., Achterbergh, E., Suzanne, Y. O., Shee, S. R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2000. 64, 133–147

23. Grimes C. B., John B. E., Kelemen P. B., Mazdab F. K., Wooden J. L., Cheadle M. J., Hanghoj K., Schwartz J. J. Trace el-

ement chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance // Geology. 2007. 35(7), 643–646.

24. Hanchar J. M., Watson E. B. Zircon saturation thermometry // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2003. 53 (1), 89–112.

25. Kostitsyn Y. A., Belousova E. A., Silant'ev S. A., Bortnikov N. S., Anosova M. O. Modern problems of geochemical and U-Pb geochronological studies of zircon in oceanic rocks // Geochemistry International. 2015. 53 (9), 759–785.

26. Shuyskiy A. S., Udoratina O. V., Miller E. L., Coble M. A. Granites of the Gerdiz massif (Polar Urals): new data // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 12. С. 23–30.

27. Soderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., Isachsen, C. E. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions // Earth and Planetary Science Letters. 2004. 219, 311–324.

28. Watson E. B., Wark D. A., and Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contributions to Mineralogy and Petrology 2006, 151(4), P. 413–433.

Reference

1. Andreichev V. L. *Geokhronologiya granitoidnogo magmatizma Pripolyarnogo Urala* (Geochronology of granitoid magmatism of the Subpolar Urals). Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center, Ural Branch of RAS, 2010, No. 11, pp. 7–12.

2. Andreichev V. A. *Izotopnaya geokhronologiya douralid Pripolyarnogo Urala* (Isotopic geochronology of preuralides of the Subpolar Urals). Syktывkar, 1999, 48 pp. (Scientific reports of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; V. 413).

3. *Vozrast tsirkonov iz granitov yadra Khobeizskogo granitogneysovogo kupola (Polyarnyy Ural)* (Age of zircons from granites of the core of the Khobeiz granite-gneiss dome (Polar Urals)). A. A. Sobolev, N. A. Kuzenkov, O. V. Udoratina, etc. Origin of igneous rocks: Mat. (X All-Russian.) Petrograph. conference Apatity: Kola Science Center RAS, 2005, pp. 236–238.

4. State geological map of the Russian Federation scale 1: 1 000 000 (third generation). Series Ural. Sheets R–40 — Severouralsk. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2005, 332 pp.

5. State geological map of the Russian Federation on a scale of 1: 200 000. Ed. II. Series North Ural. Sheet Q–41–XXV. Explanatory note, Ed. M. A. Shishkina. St. Petersburg. 2001, 210 p.

6. Demonterova Ye. I., Ivanov A. V., Karmanov N. S., Palesskiy S. V., Posokhov V. F. *Neoproterozoyskiye metaterri-gennyye porody Severo-Muyskoy glyby (Baykalo-Muyskiy po-yas): novyye dannyye po petrokhimicheskomu sostavu* (Neoproterozoic metaterrogenous rocks of the North Mui block (Baikal-Mui belt): new data on the petrochemical composition). Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent): Materials of the meeting. V. 10. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2012, V. 1, pp. 78–79

7. Denisova Yu. V. *Termometriya tsirkona iz granitoidov Pripolyarnogo Urala* (Thermometry of zircon from granitoids of the Subpolar Urals). Vestnik of the Institute of Geology of Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, No. 12, pp. 37–44.

8. Denisova Yu. V. *Tipomorficheskiye i tipokhimicheskiye osobennosti aktsessornykh tsirkonov granitoidov Pripolyarnogo Urala* (Typomorphic and typochemical features of accessory zir-

cons of granitoids of the Subpolar Urals). Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014, No. 5, pp. 9–1.

9. *Korrelyatsiya magmaticheskikh kompleksov yevropeyskogo Severo-Vostoka SSSR* (Correlation of magmatic complexes of the European Northeast of the USSR). V. N. Okhotnikov, V. I. Mizin, L. T. Belyakova et al. Syktyvkar, 1985, 25 p.

10. Makhlayev L. V. *Granitoidy severa Tsentral'no-Ural'skogo podnyatiya* (Polyarnyy i Pripolyarnyy Ural) (Granitoids of the north of the Central Ural uplift (Polar and Subpolar Urals)). Yekaterinburg, 1996, 150 p.

11. Pystin A. M. *Polimetamorficheskiye komplekсы zapadnogo sklona Urala* (Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals). St. Petersburg: Science 1994, 208 p.

12. Pystin A. M., Pystina Yu. I. *Dokembriy Pripolyarnogo Urala: khronostratigraficheskiy aspekt* (Precambrian Subpolar Urals: chronostratigraphic aspect). Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2019, No. 2, pp. 34–52.

13. Pystin A. M., Pystina Yu. I. *Metamorfizmi granitoobrazovaniye v proterozoyско-rannepaleozoyской istorii formirovaniya Pripolyarnoural'skogo segmenta zemnoy kory* (Metamorphisms granite formation in the Proterozoic-Early Paleozoic history of the formation of the Polar Ural segment of the earth's crust). Lithosphere, 2008, No. 6, pp. 25–38.

14. Pystin A. M., Pystina Yu. I. *Novyye dannyye o vozraste granitoidov Pripolyarnogo Urala v svyazi s problemoy vydeleniya kozhimskey srednerifeyской granit-riolitovoy formatsii* (New data on the age of granitoids of the Subpolar Urals in connection with the problem of isolating the Kozhym Middle Riphean granite-rhyolite formation). Vestnik of the Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. V. 4 (8), Syktyvkar, 2011, pp. 73–78.

15. Soboleva A. A., Udoratina O. V. *Douralskiye granitoidy na Urale* (Preural granitoids in the Urals). Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Syktyvkar, 2010, No. 9 (189), Issue 2, pp. 16–17.

16. Udoratina O. V., Kapitanova V. A., Kobl M. A. *Izotopnyye i geokhronometricheskiye sistemy v granitoidakh Nikolayshorskogo massiva (Pripolyarnyy Ural): novyye dannyye* (Isotopic and geochronometric systems in granitoids of the Nikolayshorsky massif (Subpolar Ural): new data). Methods and geological results of the study of isotopic geochronometric systems of minerals and rocks. Ross conf. by isotope. geochronolo-

gy. Moscow, June 5–7, 2018 Materials Conf., Moscow: IGEM RAS, 2018, pp. 360–363.

17. Fishman M. V., Goldin B. A. *Granitoidy Tsentral'noy chasti Pripolyarnogo Urala* (Granitoids of the Central part of the Subpolar Urals). Leningrad: Ed. USSR Academy of Sciences, 1963, 108 p.

18. Amelin, Y. Meteorite phosphates show constant ^{176}Lu decay rate since 4557 million years ago. Science. 2005. 310, 839–841.

19. Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., Pidgeon, R. T. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. Nature. 1999. 399, pp. 252–255.

20. Blichert-Toft J., Albarede F. The Lu–Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. Earth and Planetary Science Letters. 1997. 148, pp. 243–258.

21. Geng, J. Z., Li, H. K., Zhang, J., Zhou, H. Y., Li, H. M. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-ICP-MS. Geological Bulletin of China 30 (10). 2011, pp. 1508–1513 (in Chinese with English abstract)

22. Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., Jackson, S. E., Achterbergh, E., Suzanne, Y. O., Shee, S. R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64, pp. 133–147

23. Grimes C. B., John B. E., Kelemen P. B., Mazdab F. K., Wooden J. L., Cheadle M. J., Hanghøj K., Schwartz J. J. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. Geology, 2007, 35(7), pp. 643–646.

24. Hancher J. M., Watson E. B. Zircon saturation thermometry. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2003. 53 (1), pp. 89–112.

25. Kostitsyn Y. A., Belousova E. A., Silant'ev S. A., Bortnikov N. S., Anosova M. O. Modern problems of geochemical and U–Pb geochronological studies of zircon in oceanic rocks. Geochemistry International, 2015, 53 (9), pp. 759–785.

26. Shuyskiy A. S., Udoratina O. V., Miller E. L., Coble M. A. Granites of the Gerdiz massif (Polar Urals): new data. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2018, № 12, pp. 23–30.

27. Soderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., Isachsen, C. E. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219, pp. 311–324.

28. Watson E. B., Wark D. A., and Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. Contributions to Mineralogy and Petrology 2006, 151(4), pp. 413–433.



НЕФТЕГАЗОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ НИЖНЕКАМЕННОУГОЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРА ПРЕДУРАЛЬСКОГО ПРОГИБА

Н. Н. Рябинкина, С. В. Рябинкин

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

Проанализированы мощности и нефтегазоматеринские свойства терригенно-карбонатных турнейско-визейских отложений нижнего карбона Косью-Роговской впадины Тимано-Печорской провинции. Проведенные геохимические исследования органического вещества комплекса пород позволили уточнить оценку их углеводородного потенциала и степень зрелости заключенного в них органического вещества, а также выделить зоны наиболее вероятных очагов генерации углеводородов в нижнекаменноугольных отложениях.

Ключевые слова: органическое вещество, генерационный потенциал, углеводородный потенциал.

OIL AND GAS POTENTIAL OF LOWER CARBONIFEROUS DEPOSITS OF THE NORTH OF THE PREURAL FOREDEEP

N. N. Ryabinkina, S.V. Ryabinkin

Institute of Geology of FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The capacities and oil and gas properties of terrigenous-carbonate Tournaisian-Vissean sediments of the Lower Carboniferous of the Kosyu-Rogovskaya depression of the Timan-Pechora province are analyzed. The conducted geochemical studies of the organic matter of the rock complex made it possible to clarify the assessment of their hydrocarbon potential and the degree of maturity of the organic matter contained in them, as well as to identify the zones of the most likely foci of hydrocarbon generation in the Lower Carboniferous deposits.

Keywords: organic matter, generation potential, hydrocarbon potential.

Введение

Изучение отложений Косью-Роговской впадины, одной из самых северных впадин Предуралья, весьма актуально в настоящее время в связи с пересмотром и доизучением имеющегося материала по арктической зоне европейской части России, поиском новых перспективных структур и выделением на данной территории новых лицензионных участков.

Для оценки углеводородного (УВ) потенциала комплекса необходим анализ свойств нефтегазоматеринских пород (НГМП), получение качественных и количественных показателей состава органического вещества (ОВ), заключенного в них, выделение главного этапа нефтегазообразования в эволюции НГМП, что является основой для оценки ресурсов углеводородов нефтегазоносных бассейнов и научного обоснования нефтепоисковых работ.

Как было установлено ранее [1], нижнекаменноугольные отложения Косью-Роговской впадины Тимано-Печорской провинции (ТПП) содержат нефтематеринские породы с различными концентрациями ОВ. Нашей задачей было выделение зон развития глинистых отложений в нижнекаменноугольном комплексе, как наиболее перспективных для накопления ОВ и генерации УВ, выявление типа ОВ и степени его преобразованности, оценки их углеводородного потенциала.

Объект исследований, обсуждение результатов

Нижнекаменноугольный комплекс отложений в пределах Косью-Роговской впадины представлен карбонатными и терригенно-карбонатными породами. Терригенные породы в разрезе встречаются крайне редко в виде отдельных песчаных пластов небольшой

мощности, переслаивающихся с алевролитами, аргиллитами и глинистыми известняками прибрежных фаций мелководно-морского бассейна. Отложения серпуховского яруса преимущественно карбонатные и сульфатно-карбонатные, что связано с аридизацией климата в серпуховское время.

Кларковое содержание $C_{орг}$ для потенциально НГМП составляет в песчаниках и карбонатах 0.2 %, алевролитах — 0.4 %, глинистых породах — 0.9 % [2]. Для пород же, содержащих сапропелевое ОВ, установлены более низкие значения $C_{орг}$, разграничивающие их на нефтематеринские и нефтегазоматеринские породы: 0.1 % для карбонатных пород и 0.2 % для терригенных пород.

Нами изучены только турнейско-визейские породы нижнего карбона, которые можно отнести к НГМП, они входят в три нефтегазоносных комплекса (НГК) Тимано-Печорской провинции (ТПП). Породы серпуховского яруса можно рассматривать в качестве локального флюидоупора.

Для решения поставленных задач были проанализированы карты мощности турнейских (C_{1t}) и визейских (C_{1v}) отложений на исследуемой территории, их геохимические показатели, построена карта-схема распределения средней гамма-активности в турнейско-визейских породах (рис. 1) и рассмотрены модели прогрева по отдельным скважинам [2].

Карбонатные породы нижнекаменноугольного комплекса Косью-Роговской впадины в основном содержат сапропелевое ОВ с невысоким содержанием $C_{орг}$ (от 0.03 до 0.1 %), тогда как глинистые разности характеризуются большими значениями $C_{орг}$ (см. таблицу). Для выявления зон максимального развития (мощности и площади) глинистых отложений нами использовался радиоактивный гамма-каротаж (ГК) по имеющимся скважинам ТПП. По данным ГК рассчитывались средние значения гамма-излучения и вы-

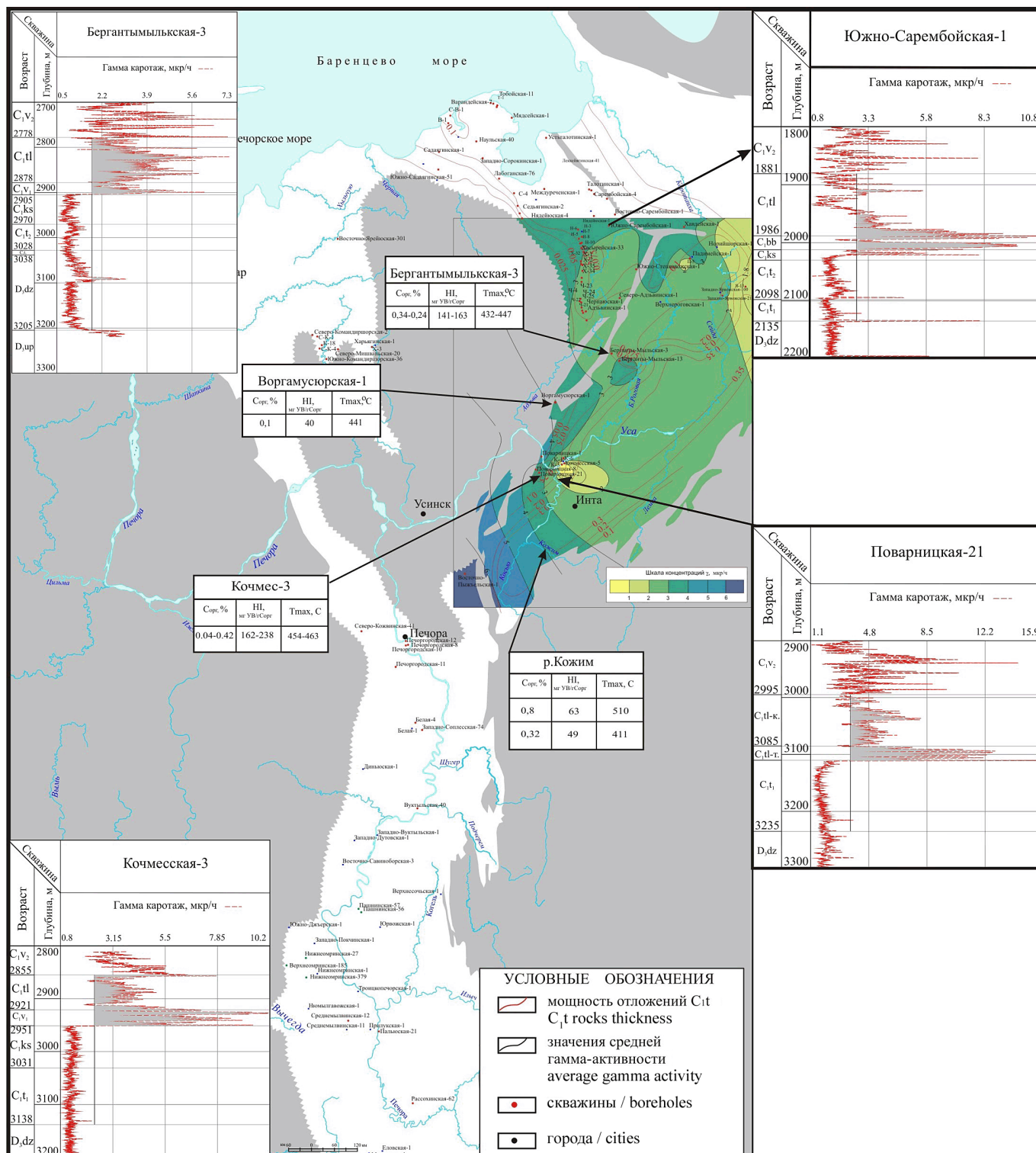


Рис.1. Карта распределения средней гамма-активности в породах C₁t-v

Fig. 1. Average gamma activity distribution in C₁t-v rocks

делялись интервалы с наибольшими значениями, которые соответствуют наиболее глинистым интервалам разреза. Описание пород нижнекаменноугольного комплекса ведется по данным описания керна и интерпретации каротажных диаграмм скважин Косью-Роговой впадины.

Породы турнейского яруса представлены серыми мелко-тонкозернистыми глинистыми известняками, неравномерно перекристаллизованными, иногда

с алевролитовой примесью. В основании разреза отмечаются пласты аргиллитов, перекрывающие верхнедевонские серые водорослевые известняки, неравномерно доломитизированные, местами слабуглистые. Условия, в которых происходило накопление осадков, можно интерпретировать как мелководно-шельфовые [3].

В породах косвинского горизонта верхнего турне глинистость разреза резко увеличивается. В западной

Геохимическая характеристика органического вещества пород
Geochemical characteristics of rock organic matter

Площадь / Area	Скважина / Borehole	Возраст / Age	Литология / Lithology	C _{орг} %	ХБА, %	T _{max}	TGP	HI	PI
Бергантымылькская Bergantymylskaya	3	D3	известняк гл. / argil. limestone	0.29	0.16	449.5	1.33	362	0.21
Бергантымылькская Bergantymylskaya	3	D3	известняк / limestone	0.29	0.04	433.8	1.11	297	0.23
Бергантымылькская Bergantymylskaya	3	D3	аргил. известняк / argil. limestone	0.23	0.02	439.2	0.9	296	0.24
Р. Кожым / Kozhym Riv.	обнажение / outcrop	C1t	аргиллит / argillite	1.55	0.0102	357	0.51	16	0.51
Р. Кожым / Kozhym Riv.	обнажение / outcrop	C1t	аргиллит / argillite	1.15	0.011	378.2	0.54	25	0.46
Р. Кожым / Kozhym Riv.	обнажение / outcrop	C1t	аргиллит / argillite	1.5	0.01	551.6	0.41	14	0.49
Р. Кожым / Kozhym Riv.	обнажение / outcrop	C1t	аргиллит / argillite			427.5	0.47	238	0.23
Р. Кожым / Kozhym Riv.	обнажение / outcrop	C1v	аргиллит / argillite			330.3	0.31	162	0.39
Кочмес / Kochmes	3	C1v-t	глинистый известняк argil. limestone	0.6	0.32	451.2	1.81	238	0.20
Кочмес / Kochmes	3	C1v	аргиллит / argillite	0.42	0.08	453.7	0.84	162	0.19
Кочмес / Kochmes	3	C1v-t	известняк / limestone	0.04	0.02	454.4	0.67		0.18
Кочмес / Kochmes	3	D3fm	известняк глинистый argil. limestone	0.14	0.08	449.4	0.86	507	0.17
Кочмес / Kochmes	3	D3fm	известняк глинистый argil. limestone	0.11	0.04	448.7	0.73	536	0.19
Кочмес Ср. / Kochmes Middle	2		аргиллит / argillite	1.59	0.02				
Пыжьельская / Pyzhel	3	C1al	известняк / limestone	0.74	0.32	434.3	2.48	269	0.20
Пыжьель Вост. / Pyzhel East.	1	C1v	аргиллит / argillite	1.34	0.16	438.1	1.41	85	0.19
Пыжьель Вост. / Pyzhel East.	1	C1v	известняк глинистый argil. limestone	0.93	0.16	434.9	3.85	380	0.08
Пыжьель Вост. / Pyzhel East.	1	C1v	известняк / limestone	0.19	0.16	428.8	0.69	268	0.26

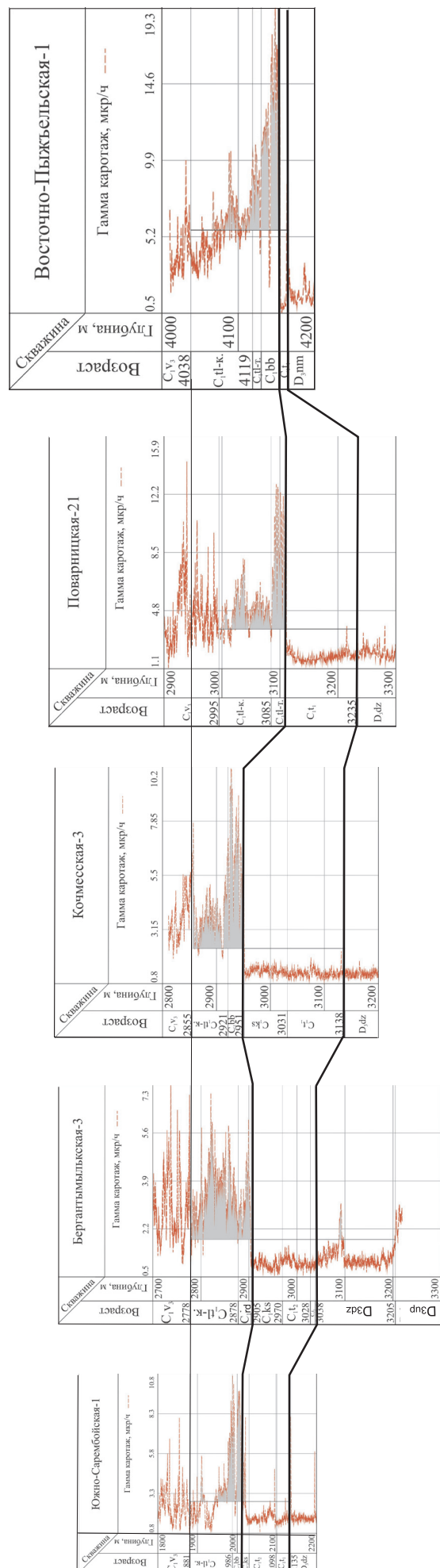


Рис. 2. Схема сопоставления турнейско-визейских отложений Косью-Роговской впадины
Fig. 2. Comparison of Tournaisian-Visean sediments of the Kosyu-Rogovskaya depression

части впадины глинистые породы, выделенные по пикам ГК, имеют широкое развитие. В разрезе они прослеживаются до известняков верхнего визе, а средние значения гамма-активности пород в этом интервале достигают до 5 мкр/час (рис. 2). Мощность турнейских отложений по площади значительно колеблется (от 50 до 350 м).

Терригенный нижневизейский (C_{1v1}) комплекс имеет небольшую мощность (до 30—40 м в скв. 3-Кочмес). Он представлен переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов и глинистых известняков. К концу ранневизейского времени зона мелководно-шельфового осадконакопления занимала большую часть Косью-Роговской впадины и седиментация имела смешанный терригенно-карбонатный характер.

Поздневизейское время ознаменовалось накоплением кремнистых и сидеритонесных глинистых илов вдоль восточного и северо-восточного бортов впадины. Позже, в мелководно-шельфовых условиях, шло накопление полидетритовых известков. Известняки *тульского горизонта* (C_{1tl}) темно-серые, с буроватым оттенком, органогенно-детритовые и органогенно-обломочные, криноидные, мелко-тонкозернистые, неравномерно перекристаллизованные, с глинистыми прослоями и углефицированным шламом. Мощность тульского горизонта до 250 м [3].

Незначительное обмеление территории на рубеже тульского и алексинского времени отразилось в накоплении пестроокрашенных глинисто-алевритовых осадков и глинистых известковых илов небольшой мощности (первые метры) со следами перерывов. В Косью-Роговской впадине среди полидетритовых и биоморфных известковых образований присутствуют обломочные известковые осадки и известняковые брекчии. Мощность карбонатных окских отложений достигает 350 м.

В конце визейского века началась частичная перестройка структурного плана провинции, а в начале серпуховского века произошло обособление северных районов ТПП и образование морской лагуны. Аридизация климата в раннесерпуховское время способствовала накоплению сульфатно-доломитовых толщ (до 100—150 м). В конце серпуховского времени морская лагуна на севере перестала существовать, и на всей территории Косью-Роговской впадины установились мелководные морские условия. В заключительную фазу позднесерпуховской седиментации увеличилась доля доломитовых илов [4]. Немалую роль в формировании осадков серпуховского века периодически играли известняковые брекчии; их мощность составляет 10—20 м, а общая мощность серпуховских образований достигает 200—300 м.

Геохимическая характеристика органического вещества

В турнейско-визейских известняках содержания органического углерода (C_{org}) изменяются в диапазоне 0.04—0.1 %, тогда как в глинисто-карбонатных разрезах его значение увеличивается до 0.3 % (см. таблицу). По данным пиролиза, водородный индекс (HI) органического вещества пород имеет низкие значения (от 40 до 138—380 мгУВ/г C_{org}), величина T_{max} увеличивается вниз по разрезу от 434 до 453 °C, что со-



ответствует крайним значениям зон катагенеза: концу МК₁ — началу МК₃. Принято считать, что при значениях $T_{\max}$ от 435 до 445 °С степень созревания ОБ будет ранней зрелости, а при 445—450 °С наступает пик нефтегенерации. Значения отражательной способности витринита (R_0 %) в породах комплекса — от 0.5 до 0.8 %. Это дает возможность предполагать, что породы находятся в основном в зоне мезокатагенеза МК₂, т. е. в зоне «нефтяного окна».

Полученные данные пиролитического анализа для значений $T_{\max}$ и водородного индекса HI указывают на то, что ОБ преимущественно *сапропелевое* и может быть отнесено ко II типу. По моделям прогрева пород [5] в скв. 3-Кочмес, скв. 1-Падимей и др. видно, что турнейско-визейский НГК вошел в зону «нефтяного окна» только в пермское время и остается в этой зоне до сих пор. Породы к настоящему времени, очевидно, полностью реализовали свой генерационный потенциал, о чем говорят низкие значения индекса продуктивности PI (0.2), а высокие значения $\beta_{\text{ХБА}}$ (от 11 и более 40) могут указывать на миграционный характер УВ.

Заключение

Таким образом, по распределению средней гамма-активности в нижнекаменноугольном комплексе отложений Косью-Роговской впадины нами выделены две зоны накопления глинистых отложений как наиболее перспективные для накопления ОБ и генерации УВ: в центральной части впадины и вдоль ее западного борта. Однако породы этих зон уже реализовали свой нефтегенерационный потенциал, следовательно они могли образовать залежи УВ как в близлежащих ловушках в разновозрастных породах, так и в более молодых вышележащих карбонатных ловушках визейско-нижнепермского НГК (C_{1v2}-P_{1ar}). Серпуховские сульфатно-доломитовые породы могли служить зональной покрывкой для небольших залежей.

Аналитические исследования были выполнены в ЦКП «Геонаука», пиролитический анализ выполнен во ВНИГНИ.

Исследования выполнены в рамках программы НИР «Геология, условия формирования и нефтегазоносность

осадочных комплексов северо-востока европейской части России, органическая геохимия нефтей и доманикитов», ГР № АААА-А17-117121270033-6.

Литература

1. Данилевский С. А., Складорова З. П., Трифачев Ю. М. Геофлюидальные системы Тимано-Печорской провинции. Ухта, 2003. 298 с.
2. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефтей. М.: Мир, 1981. 501 с.
3. Тимано-Печорский седиментационный бассейн. Атлас геологических карт / Н. И. Никонов, В. И. Богацкий, А. В. Мартынов и др. Ухта: ТП НИЦ, 2000. 64 с.
4. Нефтегазоносность и геолого-геофизическая изученность Тимано-Печорской провинции: история, современность, перспективы. Ухта, 1999. 1061 с.
5. Органическая геохимия и нефтегазоносность пермских отложений севера Предуральяского прогиба / Под. ред. Л. А. Анищенко. СПб.: Наука, 2004. 216 с.

References

1. Danilevsky S. A., Sklyarova Z. P., Trifachev Yu. M. *Geoflyuidalnye sistemy Timano-Pechorskoi provintsii* (Geofluidic systems of the Timan-Pechora province). Ukhta, 2003, 298 p.
2. Tissot B., Velte D. *Obrazovanie i rasprostranenie neftei* (Formation and distribution of oils). Moscow: Mir, 1981, 501 p.
3. *Timano-Pechorskii sedimentatsionnyi basseyn. Atlas geologicheskikh kart* (Timan-Pechora sedimentary basin. Atlas of geological maps). N. I. Nikonov, V. I. Bogatsky, A. V. Martynov and others. Ukhta: TP SIC, 2000, 64 p.
4. *Neftegazonosnost i geologo-geofizicheskaya izuchennost Timano-Pechorskoi provintsii: istoriya, sovremennost, perspektivy* (Oil and gas potential and geological and geophysical knowledge of the Timan-Pechora province: history, modern condition, prospects). Ukhta, 1999, 1061 p.
5. *Organicheskaya geohimiya i neftegazonosnost' permskikh otlozhenii severa Preduralskogo progiba* (Organic geochemistry and petroleum potential of the Permian deposits of the north of the Pre-Ural Foredeep). Ed. L. A. Anishchenko. St. Petersburg: Science, 2004, 216 p.



К 170-летию выхода в свет мемуара О. Браве
«Замечания о симметричных многогранниках в геометрии»¹

ИЗ ОПЫТА ПРЕПОДАВАНИЯ. II. ОСНОВНАЯ ТЕОРЕМА КРИСТАЛЛОГРАФИИ²

Ю. Л. Войтеховский

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Voytekhovskiy_YuL@pers.spmi.ru

Статья посвящена основной теореме классической кристаллографии — о невозможности осей симметрии n -го порядка при $n = 5$ и $n > 6$. Она имеет фундаментальное значение в естественных науках, резко разделяя минеральные и биологические структуры. Рассмотрены доказательства теоремы в ряде академических монографий и университетских учебников за последние 170 лет. Обращено внимание на методические нюансы доказательств.

Ключевые слова: основная теорема кристаллографии, оси симметрии, кристаллическая решётка.

FROM TEACHING EXPERIENCE. II. MAIN THEOREM OF CRYSTALLOGRAPHY

Yu. L. Voytekhovsky

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

The article is devoted to the main theorem of classic crystallography — on the impossibility of n -fold axes of symmetry with $n = 5$ and $n > 6$. It is fundamental in the natural sciences, sharply separating mineral and biological structures. The proofs of the theorem in many academic monographs and university textbooks over the past 170 years are considered. Attention is paid to the methodological nuances of proofs of the theorem.

Keywords: the main theorem of crystallography, symmetry axes, crystalline lattice.

Введение

Основная теорема кристаллографии — о невозможности осей симметрии n -го порядка при $n = 5$ и $n > 6$ — имеет в естественно-научном образовании (по меньшей мере, в образовании геолога) мировоззренческое значение, так как радикально отделяет минеральные структуры от биологических в том смысле, что в последних указанные оси симметрии возможны. Поэтому в университетских курсах доказательства этой теоремы должны быть строгими и ясными. Исторический обзор показывает, что при небольшом разнообразии они базируются, как правило, на решётчатом (трансляционном) строении кристалла и чаще всего выполняются методом от противного: «Допустим, ось симметрии 5-го порядка в кристалле возможна» — и сводятся к противоречию. Завершаются они обычно фразой: «Невозможность осей n -го порядка при $n > 6$ можно доказать аналогично». Это плохой методический приём, приглашающий в потенциальную бесконечность и опирающийся более на интуицию, чем на логику. А ведь кристаллография — последний оплот строгого мышления в образовании геолога. Есть доказательства, получающие разрешённые порядки осей симметрии в виде решения тригонометрического уравнения. Но и в них есть важные методические нюансы, заслуживающие обсуждения.

Важное замечание касается шехтманитов — сплавов, в которых есть локальные упорядоченные области, но нет глобальной трансляционной структуры. Последнее подчёркнуто приставкой «квази» («почти») в их названии — «квазикристаллы». Они быстро вошли в сферу интересов кристаллографов. Чтобы узаконить это, в 1992 г. Международный союз кристаллографов (МСК) переопределил кристалл как конденсированное вещество, которое даёт дискретную дифракционную картину рассеяния рентгеновских лучей. Классический кристалл стал частным случаем в мире кристаллов, а основная теорема кристаллографии потеряла свой статус. Шаг, предпринятый МСК, методологически некорректен. Понятие «кристалл» подменено понятием «объект кристаллографии» или даже «объект, интересный ряду кристаллографов». Определяя природный феномен по сути, следует апеллировать к ней же, а не к физическому методу диагностики. Что касается сути, при отнесении «почти кристаллов» к миру кристаллов акцент был заинтересованно сделан на локальных порядках, несмотря на «запрещённые» для кристаллов оси симметрии. С тем же логическим основанием он мог быть сделан на «запрещённых» осях симметрии и отсутствии трансляционного порядка.

Тема заслуживает научной дискуссии именно на страницах «Вестника Института геологии Коми НЦ УрО РАН» в память об акад. Н. П. Юшкине, стремившемся

¹ Е. С. Фёдоров [12, с. 8, 10] заметил: «Браве полагает начало новому направлению, по которому кристаллография является наукой дедуктивной, имеющей математический характер. Из весьма несовершенных воззрений Гаюи на структуру кристаллов, в трудах Браве выработалась изящная дедуктивная теория, не только не встретившая возражений, но имевшая с самого начала отклик в Германии в работах Франкенгейма, независимо и одновременно с Браве пришедшего к некоторым общим с ним результатам. Кроме теории структуры кристаллов Браве положил основание и теории симметрии — одному из важнейших отделов современного учения о фигурах. <...> Это сочинение можно считать началом возобновления в новейшее время геометрического учения о фигурах <...>, так как все предшествовавшие работы этой области были слишком отрывочны и касались почти всегда лишь небольшой группы вопросов».

² Так её назвал выдающийся российский кристаллограф и кристаллофизик, новатор-педагог и популяризатор науки Ю. В. Вульф: «Следующая теорема является основной для всего учения о кристаллографической симметрии» [6, с. 176].



максимально расширить круг объектов минералогии и кристаллографии. Но в этой статье под кристаллом понимается классический кристалл, как он понимался всеми далее упомянутыми авторами. «Основная теорема кристаллографии» для автора статьи, как и для назвавшего её Ю. В. Вульфа, сохраняет свой статус.

Исторический обзор

О. Браве (1849) доказал основную теорему в «Мемуаре о системах точек, правильно расположенных на плоскости или в пространстве» [4, с. 83]. Из предшествующего текста (рис. 1): O — точка пересечения оси симметрии порядка q с плоскостью рисунка (сетки), M — узел сетки, OM — перпендикуляр к оси симметрии, $Q = 360^\circ/q = \angle MOM' = \angle M'OM''$ — элементарный угол поворота.

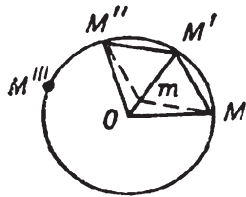


Рис. 1. К доказательству основной теоремы [4, с. 135, рис. 13]

Fig. 1. On the proof of the main theorem [4, p. 135, fig. 13]

«Совокупность [точек, образующих примитивную решётку — Ю. В.] может обладать только двойными, тройными, четверными и шестерными осями симметрии.

На MM' , $M'M''$ строим ромб $MM'M''m$. Точка m будет узлом совокупности. Легко находим, что $Om = OM' (1 - 4 \sin^2 Q/2)$. Если: $q = 2$, $Q = 180^\circ$, $Om = -3 OM'$; $q = 3$, $Q = 120^\circ$, $Om = -2 OM'$; $q = 4$, $Q = 90^\circ$, $Om = -OM'$; $q = 5$, $Q = 72^\circ$, $Om = -3\sqrt{5}/2 OM' \approx -0.382 OM'$; $q = 6$, $Q = 60^\circ$, $Om = 0$; $q > 6$, $Q < 60^\circ$, $Om < OM'$. Решения $q = 5$ и $q > 6$, очевидно, невозможны, ибо всегда можно предположить, что M взята на наименьшем расстоянии от оси вращения и, следовательно, неравенство $Om < OM'$ невозможно, исключая случай, когда $Om = 0$, ибо тогда O будет узлом совокупности. Следовательно, если совокупность обладает осью симметрии, то порядковый номер симметрии, свойственной этой оси, может быть равен $q = 2, 3, 4, 6$ ». Доказательство требует пояснений.

1. Характер поворотной точки O не оговорен. При $q = 6$ она совпадает с m , поэтому — узел сетки. Но это не обязательно [11, с. 38]: «В частном случае O может совпадать с одним из узлов». Нет пояснений в учебниках [13, с. 39]: «Точка L_n — выход оси симметрии n -го порядка $\langle \dots \rangle$. Точку L_n принимаем за узел кристаллической решётки». Аналогично [15, с. 83–84]: «Выберем произвольную точку A на оси симметрии, которая перпендикулярна плоскости чертежа. $\langle \dots \rangle$ Все точки A, B, C, D — узлы решётки». Как A превратилась в узел решётки? Пояснение есть [5, с. 67]: «Операции переноса t_1, t_2 совмещают между собой все трансляционно равные точки, в том числе и поворотные точки (оси), следовательно, эти точки образуют сетку».

Оно есть и у О. Браве [4, с. 84] со ссылкой на О. Коши: «Когда в совокупности существует ось сим-

метрии, не проходящая через узлы, то прямые, параллельные этой оси и проходящие через узлы, обладают той же симметрией. $\langle \dots \rangle$ Может случиться, что новая ось будет иметь более высокий порядок, который всегда должен быть кратным порядку симметрии рассматриваемой оси. $\langle \dots \rangle$ Без нарушения строгости можно ограничиться рассмотрением осей, проходящих через узлы».

2. Алгебраическое выражение для Om «легко находим» из подобия равнобедренных треугольников mMM' и MOM' с углами при основании $(180^\circ - Q)/2 = 90^\circ - Q/2$. Из пропорции $mM' / MM' = MM' / OM$ следует $mM' = (MM')^2 / OM$. Но $MM' = 2 OM \cos(90^\circ - Q/2) = 2 OM \sin Q/2$. Поэтому $mM' = 4 OM \sin^2 Q/2$. Окончательно $Om = OM' - mM' = OM' (1 - 4 \sin^2 Q/2)$, т. к. $OM = OM'$.

3. При $q = 2-5$ смущают отрицательные расстояния $Om = -3 OM'$, $-2 OM'$, $-OM'$ и $-0.382 OM'$. Они означают, что точки m и M' лежат по разные стороны от O . Но нельзя требовать от студента (нематематика) столь абстрактного мышления (более того, метафорического, поскольку отрицательное расстояние — нонсенс и в математике), каким обладал О. Браве. Исправить ситуацию можно, заключив тригонометрическую часть формулы под знак модуля. Но для случаев $q = 2-6$ рисунок 1 следует «распаковать». В данном виде он соответствует порядкам осей $q > 6$ и, конечно, доказывает их невозможность, так как при $0 < Q < 60^\circ$ имеем $Om < OM' = OM$ — противоречие с предположением об отсутствии узлов внутри круга радиуса OM .

4. Доказательство сводится к противоречию с решётчатым строением кристалла. Это понятно, ибо оно опубликовано рядом с выводом знаменитых «решёток Браве».

А. В. Гадолин (1867) дал исторически первый строгий вывод 32 кристаллических видов симметрии. Это было бы невозможно без доказательства основной теоремы. Оно дано в работе [7] в виде ряда утверждений: «Несколько возможных кристаллографических осей, направленных вдоль по рёбрам правильной пирамиды, могут существовать только тогда, если косинус центрального угла основания этой пирамиды есть рациональная величина» (с. 15). «При существовании оси совмещения угол совмещения может иметь только некоторые определённые значения, а именно $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ и 180° » (с. 17). Последнее содержит две леммы: «угол совмещения непременно составляет целую часть от 360° » (с. 17) и «в приложении В доказано, что целые части от 360° могут иметь рациональные косинусы только тогда, если эти косинусы имеют одно из значений $0, \pm 1/2, \pm 1$ » (с. 18). Заметим, что приложение В (с. 66–69) — исследование тригонометрических рядов, неподъёмное для большинства студентов-геологов. В целом доказательство А. В. Гадолина оригинально, но по сравнению с предыдущим более сложно. Оно интересно тем, что согласует разрешённые оси симметрии непосредственно с законом Р. Ж. Гаюи рационального отношения параметров, предшествовавшим результатам О. Браве.

Ю. В. Вульф (1897) дал своё доказательство основной теоремы, отметив: «Приводимое доказательство принадлежит Браве, но несколько изменено автором. Основной закон кристаллографии допускает между плоскостями симметрии только углы в $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ и 180° » [6, с. 176]. «Наиболее простое доказательство этого положения получим, исходя из понятия о кри-



сталлической однородности. <...> Одинаковые по своим свойствам точки кристаллической среды располагаются по прямым на равных расстояниях друг от друга, причём для различного направления прямых расстояния точек вообще различны» (Ibid.). Ю. В. Вульф получает соотношение, сходное с таковым О. Браве и разрешимое относительно углов между плоскостями симметрии: 0 и 180° , 30, 45, 60 и 90° . Далее использована теорема: «Мы должны принять во внимание результаты действия обеих плоскостей симметрии, т. е. вращения, величина которого будет 2α , если назвать α угол между плоскостями» (Ibid.). Удвоением получаются элементарные углы вращения, которым соответствуют порядки осей симметрии 2, 3, 4 и 6.

Акцент на плоскостях симметрии понятен. Именно Ю. В. Вульф в поисках единого основания свёл все элементы симметрии к плоскостям, показав, что две конечные (совместимо или зеркально) равные фигуры можно совместить не более чем тремя отражениями. И всё же предложенное им доказательство кажется отягощённым по сравнению с таковым О. Браве.

А. К. Болдырев (1926, 1930, 1931, 1934) в доказательстве основной теоремы полностью следует О. Браве. «При помощи теории Браве легко показать, что в кристаллах, кроме одинарных, двойных, тройных, четверных и шестерных осей, никаких других быть не может. Докажем это положение только для пятерной поворотной оси. Для семерной, восьмерной и т. д. доказательство будет аналогично. <...> Предположим, что пятерная поворотная ось симметрии существует в пространственной решётке...» [2, с. 83—84; 3, с. 72]. По-видимому, именно с учебников А. К. Болдырева началось пренебрежение формулами и апеллирование к аналогии, возможно, потому, что они написаны для рабфаковской молодёжи и инженерных специальностей.

В. В. Доливо-Добровольский (1937) принимает то же доказательство. Возможность дигиры, тригиры и тетрагиры он показывает на примере примитивной кубической, гексагиры — на примере гексагональной решётки. Это удачный приём. Остаётся доказать невозможность других гир. «Теорема 10. Кристаллические решётки, а следовательно и кристаллы, не могут обладать пентагирами. Предположим противное <...> Теорема 11. Кристаллические решётки, а следовательно и кристаллы, не могут обладать гирами наименования $n = 7, 8, 9$ и выше. Доказательство совершенно аналогично...» [10, с. 115—116].

Е. Е. Флинт (1937) ограничивается схемой доказательства, отсылая к предыдущим теоремам. «Эти положения ограничивают возможные порядки для поворотных осей симметрии всего четырьмя: L^2, L^3, L^4 и L^6 <...>. Причина этому очень простая. На основании теоремы 3 [всякая плоскость, проходящая через узел решётки перпендикулярно оси симметрии решётки, есть сетчатая плоскость — Ю. В.] всякий узел при вращении около оси симметрии должен оставить на сетчатой плоскости след в виде многоугольника, а согласно теореме 1 [всякая прямая, параллельная оси симметрии и проходящая через узел решётки, есть ось симметрии того же порядка для этой решётки — Ю. В.], вся эта сетчатая плоскость должна быть покрыта такими многоугольниками, плотно прилегающими друг к другу. Это вполне возможно в том слу-

чае, когда сетка состоит из параллелограммов (в частности, ромбов, прямоугольных четырёхугольников, квадратов) и правильных треугольников. Но из пятиугольников сетку построить уже нельзя, следовательно, L^5 в кристаллах невозможна. Невозможны также и все оси порядка выше 6 по той же причине» [14, с. 33—34].

Г. М. Попов и И. И. Шафрановский (1941, 1947, 1955, 1964, 1972) следуют А. К. Болдыреву и В. В. Доливу-Добровольскому, опуская выкладки. «В решётчатых системах, а следовательно и в кристаллах, невозможны оси пятого порядка и оси порядка выше шести. Докажем это положение для пятерной оси. Предположим, что пятерная ось в кристаллах возможна. <...> Пятерная ось противоречит расположению атомов в решётчатых системах и тем самым невозможна в кристаллах. Подобным же путём доказывалась невозможность существования в кристаллических телах осей семерного, восьмерного и выше порядков» [11, с. 38—39].

О. М. Аншелес (1952) повторяет предыдущих авторов. «Докажем, что в пространственной решётке невозможны оси симметрии пятого порядка и порядков выше шестого. <...> Применим метод доказательства, которым часто пользуются в геометрии и который называется «доказательством от противного». Предположим, что пятерная ось симметрии возможна в пространственной решётке. <...> Таким образом, существование пятерной оси симметрии противоречит свойствам пространственных решёток. <...> Таким же образом доказывалась невозможность существования в кристаллах осей симметрии n -го порядка, если $n > 6$ » [1, с. 88—90].

Б. Н. Делоне, Р. В. Галиулин и М. И. Штогрин (1974) излагают схему доказательства по О. Браве в двух предложениях. «Порядок поворотной оси, совмещающей решётку с собой, может быть только 2, 3, 4 или 6. Для доказательства примем за точку М самую близкую к оси точку решётки, лежащую в плоскости Р, перпендикулярной к оси, но не лежащую на самой оси. Для всех правильных многоугольников, кроме двугульника, правильного треугольника, квадрата и правильного шестиугольника, откладывая соответствующим образом вектор, соединяющий две последовательные его вершины, из какой-нибудь его вершины, можно получить точку решётки, лежащую в плоскости Р, не лежащую на оси, но лежащую к ней ближе, чем точка М, что противоречит нашему предположению о точке М» [9, с. 314; 8, с. 62].

Б. К. Вайнштейн (1979) тоже следует О. Браве (рис. 2). «Рассмотрим плоскую сетку и возможные повороты плоскости, совмещающие сетку с собой. Поворотные точки (оси), если они есть, сами являются точками этой плоскости. Операции переноса t_1, t_2 совмещают между собой все трансляционно равные точки, в том числе и поворотные точки (оси), следовательно, эти точки образуют сетку. Выберем в сетке ряд таких точек, для которого расстояние a между ними — кратчайшее, и рассмотрим действие какой-то поворотной точки N из этого ряда на две ближайшие точки N' и N''» [5, с. 67].

Далее показано, что оси $N = 2, 3, 4$ и 6 не противоречат, а оси $N = 5$ и $N > 6$ противоречат минимальности расстояния a между узлами. Но автор обходится без построения ромба, порождающего узел сетки, противо-

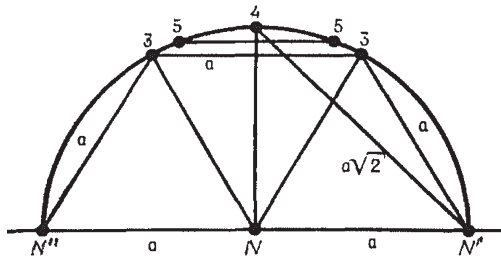


Рис. 2. К доказательству основной теоремы [5, с. 67, рис. 39]

Fig. 2. On the proof of the main theorem [5, p. 67, fig. 39]

речащий допущению. При $N = 5$ повороты точек N' и N'' в разных направлениях дают вершины правильного 10-угольника. При $N > 6$ достаточно поворотов одной из точек N' или N'' . Во всех этих случаях противоречие создаётся тем, что при $N > 6$ сторона правильного N -угольника меньше радиуса описанной окружности.

Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фаддеев (2006) и С. К. Филатов, С. В. Кривовичев, Р. С. Бубнова (2018) приводят два сходных доказательства, интересных тем, что разрешённые порядки осей симметрии получаются из тригонометрического уравнения (рис. 3). «Одним

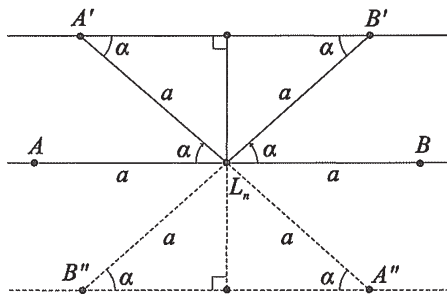


Рис. 3. К доказательству основной теоремы [13, с. 39–40, рис. 2.2]

Fig. 3. On the proof of the main theorem [13, p. 39–40, fig. 2.2]

из красивейших следствий решётчатого строения кристаллов является основной закон симметрии кристаллов, утверждающий, что в кристаллах возможны поворотные и инверсионные оси симметрии лишь 1, 2, 3, 4 и 6 порядков. Докажем эту теорему. На рисунке точка L_n — выход оси симметрии n -го порядка с элементарным углом поворота $360/n = \alpha$. Точку L_n принимаем за узел кристаллической решётки. Слева и справа от неё на расстоянии a расположены узлы решётки A и B . Повернём эти узлы на угол α вокруг оси симметрии: точку A по ходу часовой стрелки, точку B — против часовой стрелки (в обоих случаях решётка совместится сама с собой в соответствии с определением оси симметрии L_n). Полученные точки A' и B' лежат на прямой, параллельной трансляции a , следовательно, в кристалле между ними должно укладываться целое число трансляций na . Из рисунка следует также, что $na = A'B' = 2a \cos \alpha$, откуда $n = 2 \cos \alpha$. В правой части последнего равенства стоит целочисленная функция. Это возможно при значениях косинуса 1, $1/2$, 0, $-1/2$ и -1 , что отвечает элементарным углам поворота 0° , 60° , 90° , 120° и 180° соответственно, т. е. осям симметрии 1, 6, 4, 3 и 2 порядков» [13, с. 39–40].

Шероховатости рассуждения очевидны. 1. Точку L_n можно принять за поворотную, но за узел решётки — с пояснениями (см. выше). 2. Важно подчеркнуть, что узлы A и B — ближайшие к L_n , т. е. a — элементарная трансляция, иначе в отрезке $A'B'$ не обязательно вмещается целое число трансляций na . 3. При отрицательных значениях $\cos \alpha$ получаем отрицательное число трансляций. Следует пояснить, что при углах 120° и 180° трансляции в направлении AB противоположны трансляциям в направлении $A'B'$. 4. Следует убедиться, что для полученных углов α между образами точек A и B нет расстояний, меньших a , как это сделано у Б. К. Вайнштейна [5, с. 67].

Обсуждение

Обзор показал, что в доказательстве основной теоремы почти все авторы (кроме А. В. Гадолина) отталкиваются от решётчатого строения кристалла по О. Браве. И почти все (кроме Ю. В. Вульфа) работают прямо с осями симметрии. Часть авторов строго следуют О. Браве, получая двуединый результат: непротиворечивость порядков $n = 2, 3, 4, 6$ и, наоборот, противоречивость $n = 5$ и $n > 6$. При этом В. В. Доливо-Добровольский разрушает гордиев узел, доказывая возможность порядков $n = 2, 3, 4, 6$ предъявлением примеров (рис. 4). Заметим, что на них же удоб-

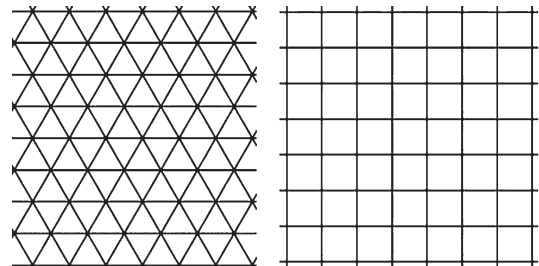


Рис. 4. Решётки с осями симметрии 6, 3, 2 (слева) и 4, 4, 2 (справа)

Fig. 4. Lattices with symmetry axes 6, 3, 2 (left) and 4, 4, 2 (right)

но пояснить теорему Коши — Браве о соотношении порядков осей симметрии, проходящих и не проходящих через узлы решётки. Невозможность порядков $n = 5$ и $n > 6$ легче всего показать по О. Браве (рис. 1) с учётом сделанных оговорок. Впрочем, последние два доказательства (рис. 3) привлекают тем, что получают разрешённые порядки осей симметрии из уравнения, не оставляя места рассуждениям о запрещённых порядках. Но и здесь важен ряд оговорок и предъявление решёток с разрешёнными осями симметрии.

Заключение

Ещё раз подчеркнём мировоззренческое значение основной теоремы кристаллографии, резко разделяющей минеральные и биологические структуры. Вспоминается метафора, приписываемая Н. В. Белову: «Жизнь защищается от кристаллизации осью пятого порядка» и рефрен И. И. Шафрановского: «Крепко запомните не бывает пятиугольных снежинок!». Что касается доказательств теоремы в университетском курсе



кристаллографии, преподаватель волен выбирать, исходя из подготовленности студентов и личных пристрастий. Лучше всего показать студентам (факультативно) весь спектр доказательств, расширяя их кругозор, прививая любовь к строгости мышления и истории науки. Мы постарались оттенить особенности разных подходов. Основная теорема кристаллографии не сложна, но не примитивна. В любом доказательстве есть целый ряд нюансов. Как всегда, «дьявол кроется в мелочах».

В связи с объективным расширением круга кристаллографических объектов профессиональному обществу следует определить принципы и предвидеть последствия. Кажется очевидным, что не относится к кристаллографии объект, в котором нет никакого порядка. Но математическое определение порядка весьма широко. Поэтому, разрешая глобальные и локальные, строгие и нестрогие, квази- и фрактальные (масштабно-инвариантные) порядки, мы закономерно придём к инвариантности произвольной характеристики объекта. Грядущий методологически последовательный результат — Земля как кристалл: в пространственной организации видим оболочки, в истории реконструируем периодические процессы... Но не слишком ли много для кристаллографии?

Выше сказано вслед многим предшественникам, что основная теорема кристаллографии резко разделяет минеральные и биологические структуры. Эта формулировка была бы ещё более корректной, если бы в биологии имела место сходная теорема, пусть не исчерпывающая вопрос, хотя бы ослабленная, запрещающая какие-либо элементы симметрии и их сочетания. Разрешённые элементы симметрии и их сочетания известны исключительно по наблюдениям в природе. Возможны ли такие теоремы для биологических объектов? Отметим эту тему для другой статьи.

Автор благодарит рецензентов за профессиональные замечания, способствовавшие более ясному изложению статьи.

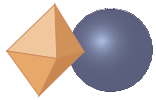
Литература

1. Аншелес О. М. Начала кристаллографии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1952. 276 с.
2. Болдырев А. К. Основы кристаллографии. Л.: Изд. КУБУЧ'а, 1926. 186 с.
3. Болдырев А. К. Кристаллография. Л.: Областлит, 1930. 331 с. (2-е изд. 1931. 331 с.; 3-е изд. 1934. 431 с.)
4. Браве О. Избранные научные труды. Кристаллографические этюды. Л.: Наука, 1974. 419 с.
5. Вайнштейн Б. К. Современная кристаллография. Т. 1. Симметрия кристаллов, методы структурной кристаллографии. М.: Наука, 1979. 384 с.
6. Вульф Ю. В. Симметрия и вывод всех её кристаллографических видов // Избранные работы по кристаллофизике и кристаллографии. М.-Л.: Гостехиздат, 1952. С. 167—191.
7. Гадолин А. В. Вывод всех кристаллографических систем и их подразделений из одного общего начала. Л.: Изд-во АН СССР, 1954. 156 с.
8. Галиулин Р. В. Кристаллографическая геометрия. М.: URSS, 2009. 136 с.
9. Делоне Б. Н., Галиулин Р. В., Штогрин М. И. Геометрический вывод результатов Браве // Браве О. Избранные научные труды. Кристаллографические этюды. Л.: Наука, 1974. С. 310—322.

10. Доливо-Добровольский В. В. Курс кристаллографии. Л.-М.: ОНТИ, 1937. 348 с.
11. Попов Г. М., Шафрановский И. И. Кристаллография. М.-Л.: Гостеолиздат, 1941. 242 с. (2-е изд., 1947. 262 с.; 3-е изд. 1955. 296 с.; 4-е изд. 1964. 370 с.; 5-е изд. 1972. 352 с.)
12. Фёдоров Е. С. Курс кристаллографии. СПб.: Тип. П. П. Сойкина, 1897. 376 с.
13. Филатов С. К., Кривовичев С. В., Бубнова Р. С. Общая кристаллохимия. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2018. 276 с.
14. Флинт Е. Е. Практическое руководство по геометрической кристаллографии. М.-Л.: ОНТИ, 1937. 156 с.
15. Чупрунов Е. В., Хохлов А. Ф., Фаддеев М. А. Основы кристаллографии. М.: Физматлит, 2006. 500 с.

References

1. Ansheles O. M. *Nachala kristallografii* (Rudiments of crystallography). Leningrad: Leningrad State University, 1952, 276 pp.
2. Boldyrev A. K. *Osnovy kristallografii* (Crystallography basics). Leningrad: KUBUCH, 1926, 186 pp.
3. Boldyrev A. K. *Kristallografiya* (Crystallography). Leningrad: Oblastlit, 1930, 331 pp. (2nd ed., 1931, 331 pp.; 3rd ed., 1934, 431 pp.)
4. Bravais A. *Izbrannyye nauchnyye trudy. Kristallograficheskiye etyudy* (Selected scientific works. Crystallographic etudes). Leningrad: Nauka, 1974, 419 pp.
5. Weinstein B. K. *Sovremennaya kristallografiya. T. 1. Simmetriya kristallov, metody strukturnoy kristallografii* (Modern crystallography. Vol. 1. Symmetry of crystals, methods of structural crystallography). Moscow: Nauka, 1979, 384 pp.
6. Wulf Yu. V. *Simmetriya i vyvod vseh eyo kristallograficheskikh vidov. V: Izbrannyye raboty po kristallofizike i kristallografi* (Symmetry and derivation of all its crystallographic species. In: Selected works on crystal physics and crystallography). Moscow-Leningrad: Gostekhizdat, 1952, pp. 167—191.
7. Gadolin A. V. *Vyvod vseh kristallograficheskikh sistem i ikh podrazdeleniy iz odnogo obshchego nachala* (Derivation of all crystallographic systems and their divisions from one general origin). Leningrad: Acad. Sci. USSR, 1954, 156 pp.
8. Galiulin R. V. *Kristallograficheskaya geometriya* (Crystallographic geometry). Moscow: URSS, 2009, 136 pp.
9. Delaunay B. N., Galiulin R. V., Shtogrin M. I. *Geometricheskii vyvod rezul'tatov Brave. V: Brave O. Izbrannyye nauchnyye trudy. Kristallograficheskiye etyudy* (Geometric derivation of Bravais' results. In: Bravais A. Selected scientific works. Crystallographic etudes). Leningrad: Nauka, 1974, pp. 310—322.
10. Dolivo-Dobrovolsky V. V. *Kurs kristallografii* (Crystallography course). Leningrad-Moscow: ONTI, 1937, 348 pp.
11. Popov G. M., Shafranovsky I. I. *Kristallografiya* (Crystallography). Moscow-Leningrad: Gosgeolizdat, 1941, 242 pp. (2nd ed., 1947, 262 pp.; 3rd ed., 1955, 296 pp.; 4th ed., 1964, 370 pp.; 5th ed., 1972, 352 pp.)
12. Fedorov E. S. *Kurs kristallografii* (Crystallography course). Saint-Petersburg: Typ. of P. P. Soykin, 1897, 376 pp.
13. Filatov S. K., Krivovichev S. V., Bubnova R. S. *Obshchaya kristallokhimiya* (General crystal chemistry). Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University, 2018, 276 pp.
14. Flint E. E. *Prakticheskoye rukovodstvo po geometricheskoy kristallografi* (Practical guide to geometric crystallography). Moscow-Leningrad: ONTI, 1937, 156 pp.
15. Chuprunov E. V., Khokhlov A. F., Faddeev M. A. *Osnovy kristallografii* (Crystallography basics). Moscow: Fizmatlit, 2006, 500 pp.

14th ICAMInternational Congress
for Applied Mineralogy

ПРИКЛАДНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ: ИЗ БЕЛГОРОДА В АВЕЙРО APPLIED MINERALOGY: FROM BELGOROD TO AVEIRO

14-й Международный конгресс по прикладной минералогии, Белгород, 23–27 сентября 2019 г.
14th International Congress on Applied Mineralogy, Belgorod, September 23–27, 2019



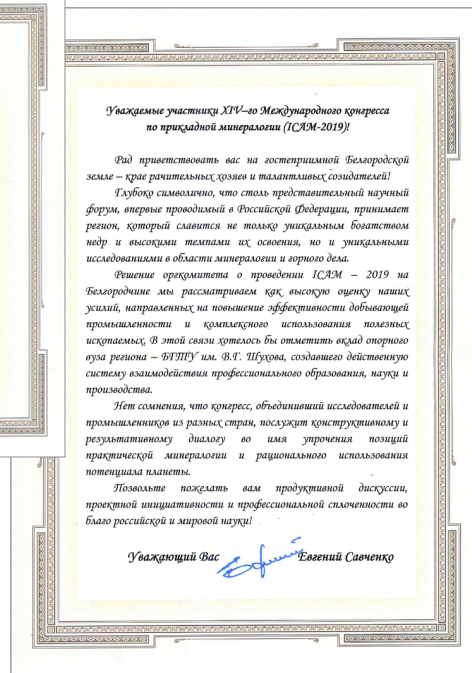
According to the decision of the Bureau of the Council of the International Commission for Applied Mineralogy (ICAM) of the International Mineralogical Association (IMA), adopted in November 2015, our country was for the first time elected to host the 14th International Congress for Applied Mineralogy — a very prestigious scientific event in the world. It should be noted that this decision for the Russian Federation was adopted unanimously.

September 23–27, 2019 in Belgorod the V. G. Shukhov Belgorod State Technological University hosted the 14th International Congress for Applied Mineralogy (www.geo.komisc.ru/icam2019) (ICAM 2019).

The congress was organized by: International Mineralogical Association (IMA); Russian Mineralogical Society (RMS); Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; Russian Academy of Sciences (RAS); Government of the Belgorod Region; Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAABS); Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; Institute of Geology

В соответствии с решением бюро Совета Международной комиссии по прикладной минералогии (ICAM — International Commission on Applied Mineralogy) Международной минералогической ассоциации (IMA — International Mineralogical Association), принятым в ноябре 2015 года, наша страна впервые была выбрана для проведения 14-го Международного конгресса по прикладной минералогии — весьма престижного в мире научного мероприятия. Отметим, что указанное решение в отношении Российской Федерации было принято единогласно.

23–27 сентября 2019 г. в Белгороде на площадке Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова (БГТУ



Academician A. M. Askhabov, member of National Program Committee

Академик А. М. Асхабов, член Национального программного комитета. Пленарное заседание



Academician L. A. Vaisberg, Chairman of National Program Committee

Академик Л. А. Вайсберг, председатель Национального программного комитета

им. В. Г. Шухова) состоялся 14-й Международный конгресс по прикладной минералогии (www.geo.komisc.ru/icam2019) (ICAM 2019).

Организаторами конгресса выступили: Международная минералогическая ассоциация (IMA); Российское минералогическое общество

named after Academician N. P. Yushkin FRC Komi SC UB RAS (IG FRC Komi SC UB RAS); Scientific and Production Corporation «Mekhanobr-Tekhnika».

The National Organizing Committee included from Belgorod region: E. S. Savchenko — Governor of the Belgorod Region, Corresponding Member of RAS; S. N. Glagolev — Rector of V. G. Shukhov BSTU, Professor; V. V. Strokov — Professor of RAS, member of the RMS Academic Council. From the Russian Academy of Sciences: Academicians of the Russian Academy of Sciences D. V. Rundkvist, D. Yu. Pushcharovsky, A. O. Gliko; Corresponding Member of RAS V. V. Maslennikov; from the RAS Department of Earth Sciences — N. A. Zaytseva; from the RMS Commission for Technological Mineralogy and IG FRC Komi SC UB RAS I. N. Burtsev and N. N. Timonina.

The National Program Committee was headed by Academician L. A. Vaisberg. The Committee included representatives of leading scientific organizations of the Russian Academy of Sciences, industry organizations, universities and industrial associations — academicians of the Russian Academy of Sciences: A. M. Askhabov, N. S. Bortnikov; N. V. Sobolev; V. A. Chanturia; Corresponding members of the Russian Academy of Sciences: S. V. Krivovichev, Yu. B. Marin; Doctors of Sciences: T. N. Matveeva, O. B. Kotova, E. G. Ozhogina, O. V. Frank-Kamenetskaya, V. V. Shchiptsov.

(РМО); Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Российская академия наук (РАН); Правительство Белгородской области; Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН); Белгородский государственный технологический университета имени В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова); Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН); Научно-производственная корпорация «Механобр-техника».

В состав **Национального организационного комитета** вошли от Белгородской области: Е. С. Савченко — губернатор Белгородской области, чл.-корр. РАН; С. Н. Глаголев — ректор БГТУ им. В. Г. Шухова, профессор; В. В. Строкова — профессор РАН, член Ученого совета РМО. От Российской академии наук — академики РАН Д. В. Рундквист, Д. Ю. Пущаровский, А. О. Глико; член-корреспондент РАН В. В. Масленников; от ОНЗ РАН — Н. А. Зайцева; от Комиссии по технологической минералогии РМО и ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН — И. Н. Бурцев и Н. Н. Тимонина.

Национальный программный комитет возглавил академик РАН Л. А. Вайсберг. В Комитет вошли представители ведущих научных организаций РАН, отраслевых организаций, ВУЗов и производственных объединений, академики РАН: А. М. Асхабов, Н. С. Бортников; Н. В. Соболев; В. А. Чантурия;



*Dear Participants of the 14th International Congress
for Applied Mineralogy!*

On behalf of the Presidium of the Russian Mineralogical Society, let us congratulate you with this important scientific event and express our hope for the successful and productive work at its sessions and symposia.

Challenges that will be considered at the Congress, which is held in Russia for the first time, are exceptionally broad. They coincide with many directions that were recently developed by the Russian Mineralogical Society at its Commission on technological mineralogy, environmental mineralogy and geochemistry, crystal chemistry and spectroscopy, and organic mineralogy.

In 2017, the Russian Mineralogical Society (RMS) celebrated its 200th anniversary, and today, it unites more than twelve hundred members from different fields and disciplines. RMS sections are present in many scientifically important cities and mining regions of our country. RMS members are actively solving important problems of development and production of raw materials for nuclear, diamond, rare metal, and oil industries.

The continuing progress in microscopy (electron, tunnel, atomic force) brought mineralogical studies to the micro- and nanolevels. Intervention into micro- and nanoworlds is an important new stage of development of modern mineralogy and mineralogical crystallography. Due to the success in these fields, a range of new possibilities was opened for:

- prospecting and elaboration of novel types of mineral deposits,
- solution of the remediation problems for mining regions and the rational use of mine tailings,
- deeper understanding of the nature of oil fields, organic minerals and biominerals,
- creation of principally new geo-inspired materials with improved functional properties.

The methods of mineralogical sciences are still in the focus of problems that are faced by Earth sciences, rational use of natural resources, conservation of natural diversity, and cultural heritage of the humankind.

We are sure that the Congress will demonstrate a broad spectrum of important scientific discoveries, will develop new directions for research and exploration in applied mineralogy, and, last but not least, will provide a lavish basis for new professional contacts and collaborations.

Wishing you great inspiration, new discoveries, and achievements.

Yury B. Marin
*President of the Russian Mineralogical Society,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences*
Sergey V. Krivovichev
*Vice-President of the Russian Mineralogical Society,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences*





The International Committee included — from the ICAM Council: Saverio Fiore, President of the Council, Italy; Olga Kotova, Vice President of the Council, Russia; Council Secretary General, Dieter Rammlmair, Germany; from IMA-CAM Maarten A. T. M. Broekmans, Norway, Chair; Jan Elsen, Secretary, Belgium.

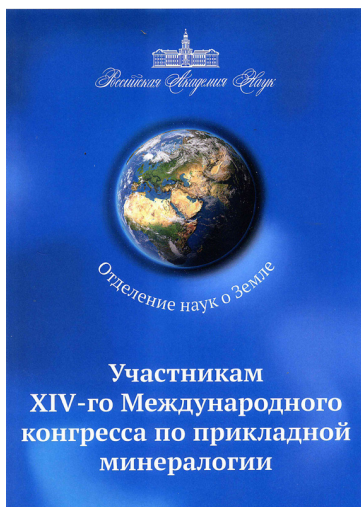
The general sponsor of the Congress was Management Company Metalloinvest.

Information support of the Congress was provided by the journals: Ore Dressing, Exploration and Mineral Protection, Building Materials, Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Ores and Metals, Vestnik of the Institute of Geology of Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Vestnik of the Department of Earth Sciences of the RAS.

The Congress target audience was researchers from Europe, Asia, America, Australia and Africa, who for five days presented their latest achievements and developments in research and application of the planet's natural resources. 122 reports of 340 authors were announced for the Congress.

The opening ceremony of the Congress took place on September 23 in the Shukhov congress hall of BSTU. Welcoming speeches were made by representatives of the Belgorod Region, BSTU, the International Mineralogical Association, the Russian Academy of Sciences and the Russian Mineralogical Society.

The speakers of the **Plenary session** reflected the most significant problems of applied mineralogy. For example,



члены-корреспонденты РАН: С. В. Кривовичев, Ю. Б. Марин; доктора наук: Т. Н. Матвеева, О. Б. Котова, Е. Г. Ожогина, О. В. Франк-Каменецкая, В. В. Щипцов.

В состав **Международного комитета** вошли — от

Совета ICAM Саверио Фиоре (Saverio Fiore), президент Совета, Италия; Ольга Котова, вице-президент Совета, Россия; генеральный секретарь Совета, Дитер Раммльмайр, Германия; от IMA-CAM Мартин Брукманс, Норвегия (председатель); Ян Элсен, Бельгия (секретарь).

Генеральным спонсором конгресса выступила ООО «Управляющая компания Металлоинвест».

Информационную поддержку в организа-

ции Конгресса оказали журналы: «Обогащение руд», «Разведка и охрана недр», «Строительные материалы», «Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова», «Руды и металлы», «Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН», «Вестник Отделения наук о Земле РАН».

Целевой аудиторией Конгресса стали ученые из Европы, Азии, Америки, Австралии и Африки, в течение пяти дней представлявшие новейшие достижения и разработки в исследовании и применении природных богатств планеты. Для участия в конференции было заявлено 122 доклада 340 авторов.

Церемония открытия Конгресса состоялась 23 сентября в Шуховском конгресс-зале БГТУ. С приветственными словами выступили представители Белгородской области, БГТУ, Международной минералогической ассоциации, Российской академии наук и Российского минералогического общества.

Основные научные направления, которые охватил Конгресс, коснулись современных методов исследования горных пород и минералов, полезных ископаемых, геометаллургии и процессов переработки, биоминералогии, функциональных материалов, углеводородного сырья, экологии, в рамках которых работали 9 секций. Сделано 16 пленарных, 70 устных и 36 стендовых докладов.

Докладчики **пленарной сессии** отразили наиболее значимые проблемы прикладной минералогии. Академик Асхаб Асхабов (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар) в своем докладе, посвященном результатам и перспективам минералогического вторжения в наномир, среди прочего отметил появление протоминерального мира в повестке дня минералогической науки и связал перспективы развития прикладной минералогической науки, в том числе прикладной минералогии, с программой



Shukhov Congress Hall. Opening Ceremony, conveners of plenary sessions (from left to right) Olga Kotova, IF FRC Komi SC UB RAS, and Valeria Strokova, Shukhov BSTU, Sergey Glagolev, Rector of Shukhov BSTU, Olga Pavlova, deputy governor of Belgorod region

Шуховский конгресс-зал, церемония открытия, оргкомитет пленарных заседаний (слева направо): Ольга Котова, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН; Валерия Строчкова, БГТУ им. В. Г. Шухова; Сергей Глаголев, ректор БГТУ им. В. Г. Шухова; заместитель губернатора Белгородской области Ольга Павлова



Delegation from the Institute of Geology (from left to right): Igor Perovsky, Aleksey Ponaryadov, Igor Burtsev, Natalia Timonina, Askhab Askhabov, Olga Kotova, Dmitry Kamashev

Делегация Института геологии (слева направо): Игорь Перовский, Алексей Понарядов, Игорь Бурцев, Наталья Тимонина, Асхаб Асхабов, Ольга Котова, Дмитрий Камашев

Academician A. M. Askhabov (IG FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar) noted the appearance of the protomineral world in the mineralogical science agenda and linked the development of applied mineralogy with a program of priority experiments to study nanobjects (in the range from individual atoms and molecules to the first “nanoindividuals” of mineral substance) with the use of the European XFEL.

Researchers assign the further development of interrelated problems of rational use of natural resources to a qualitatively new level of researches of the mineral and material composition of multicomponent ores, suggesting their methods and approaches, for example, from the perspective of complex and deep processing (Valentin Chanturia, Tamara Matveeva | Institute for the Problems of Integrated Subsoil Development of the Russian Academy of Sciences, Moscow) or from the point of view of innovation in engineering by the example of molybdenum-scheelite ores (Leonid Vaysberg, Oleg Kononov, Ivan Ustinov | Mekhanobr-Tekhnika, St. Petersburg and Moscow State University, Moscow).

By combining their scientific potential in the field of technological mineralogy, Olga Kotova (IG FRC Komi SC, UB RAS, Syktyvkar) and Elena Ozhogina (VIMS,

первоочередных экспериментов по изучению нанобъектов (в диапазоне от отдельных атомов и молекул до первых «наноиндивидов» минерального вещества) с привлечением Европейского лазера на свободных электронах.

Дальнейшее развитие взаимосвязанных проблем рационального использования природных ресурсов ученые связывают с качественно новым уровнем исследований минерального и вещественного состава многокомпонентных руд, предлагая свои методы и подходы, например, с позиции комплексной и глубокой переработки (Валентин Чантурия, Тамара Матвеева | Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва) или с позиции инноваций в инжиниринге на примере молибдено-шеелитовых руд (Леонид Вайсберг, Иван Устинов | НПО «Механобр-Техника», Санкт-Петербург и Олег Кононов | Московский государственный университет, Москва). Объединив свой научный потенциал в области технологической минералогии Ольга Котова (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар) и Елена Ожогина (ВИМС, Москва) продемонстрировали алгоритм вовлечения во вторичную переработку отхо-



*Here is the few words **about Applied Mineralogy***

As you know I use optical microscope (reflected one in particular) with EPMA, XRD and Raman to resolve problems arising from mineralogical issues in a fairly broad areas from process mineralogy to material science. Minerals are all around us since the early man. It appears that the tendency towards natural materials and dependence on natural resources will definitely continue. Thus importance and popularity of applied mineralogy will be increasing in the future.

Thanks for everything. I sure had a pleasant time in Belgorod.

I enjoyed the Russian food as well. Organization was hassle free. All well organized. Congress hall was also impressive. All in all, it was a privilege for me.

Prof. Emin Ciftci
Istanbul Technical University Faculty of Mines
Department of Geological Engineering,
Istanbul, Turkey



Moscow) demonstrated the algorithm of involvement of mining wastes (enclosing and overburden rocks, off-balance ores, dumps) and processing (slags, sludges, ash slags, ashes) industries by the example of Ni- and Al-raw.

Chinese colleagues (Professors Faqin Dong, Qunwei Dai and Shiyong Sun, Southwest University of Science and Technology of China, Minyang) focused on the micro-organism-mineral-pollutant systems as an innovative approach to increase control of hydrogeological landscape conditions (travertine of the main heritage sites of Jiuzhaigou), environmental pollution and environmental rehabilitation technologies.

Such a popular topic as “minerals as prototypes of advanced materials and mineral formation as the basis for the development of nature-like technologies” were also reflected in the plenary reports. We would like to emphasize the presentation of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences Valery Maslennikov (Institute of Mineralogy, UB RAS), who summarized the results of 15 years of work together with Professor Ross Large (CODES — Center of Ore deposits research, Tasmania University) in the field of LA-ICP-MS geochemistry of massive sulfide and orogenic gold deposits. German colleagues emphasized the importance of the geochemistry and mineralogy of the tailings of a copper mine in northern central Chile in the formation of the country economic potential and strategies to reduce environmental impact (K. Berkh, D. Rammlmair, M. Drobe, J. Meima “Case study: Geochemistry and mineralogy of Copper mine tailings in northern central-Chile”). Corresponding Member of the Russian Academy

дов горнодобывающих и перерабатывающих производств на примере Ni- и Al- сырья.

Китайские коллеги (профессора Faqin Dong, Qunwei Dai и Shiyong Sun | Юго-Западный университет науки и техники Китая, Миньянг) сфокусировали внимание на системе микроорганизм — минерал — загрязнитель, основе инноваций повышения возможностей в поле контроля гидрогеологических условий ландшафта (на примере травертина основных объектов наследия Цзючжайгоу), загрязнения окружающей среды и технологий экологической реабилитации.

Член-корреспондент РАН Валерий Масленников (Институт минералогии УрО РАН) в докладе обобщил результаты 15 летней работы совместно с профессором Ross Large (CODES — Centre of Ore deposits research, Tasmania University, Australia) в области LA — ICP-MS геохимии массивных сульфидных и орогенных месторождений золота.

Немецкие коллеги подчеркнули важность геохимии и минералогии хвостов при формировании экономического потенциала страны и стратегии уменьшения воздействия на окружающую среду на примере медного рудника на севере центральной части Чили (K. Berkh, D. Rammlmair, M. Drobe, J. Meima «Case study: Geochemistry and mineralogy of Copper mine tailings in northern central-Chile»).

Член-корреспондент РАН Сергей Кривовичев с соавторами в докладе предложили муратаит-пироксид титанатную керамику на основе отходов, способ-



Shukhov BSTU, Shukhov Hall. ICAM Council meeting. Olga Kotova, Russia; Maarten Broekmans, Norway; Dieter Rammlmair, Germany

Шуховский зал БГТУ. Заседание Совета ICAM. Ольга Котова, Россия; Мартин Брукманс, Норвегия; Дитер Рамлмайр, Германия



T1: geometallurgy, technological mineralogy and processing of mineral raw

Section T1 appears to be central to Congress (not to mention, of course, plenary presentations).

My view of the situation is that the dominant reports in the field of applied mineralogy and metallurgy of ore deposits were studies of the material composition of finely disseminated non-ferrous and ferrous metals, fundamental prerequisites for the use of combined processing technologies for refractory ores and industrial wastes, as well as studies of promising types of ores containing layered and clay minerals. That is, the topics of the reports were quite in the trend of developing the fundamental foundations for improving the technology of tomorrow.

Among the outstanding reports at T1 section, I would like to mention a series of reports by Emin Chiftici on the study of extremely finely disseminated polymetallic ores in the northern part of Turkey, a report by Olga Kotova on the effect of accelerated electrons on the structure of minerals, and a report by Andrey Gerasimov on the effect of layered silicates on the physicochemical properties of ores and thermochemical control of these properties.

General impression. The work of the congress was well organized. At all stages of the preparation and conduct of the Congress we felt a confident leadership of Professor Olga Kotova, and at the stage of the Congress itself, the active positive influence of Professor Valeria Strokova. The genuine hospitality of the receiving party was constantly felt. The friendly attitude towards the members of the permanent members of the ICAM Council, as well as members of the organizational and program committees of the congress, was very noticeable.

Prof. Ivan Ustinov —

Research and Engineering Corporation Mekhanobr-Tekhnika, St.-Peterburg, Russia

of Sciences Sergey Krivovichev with co-authors suggested murataite-pyrochlore titanate ceramics as an attractive form of wastes, which could immobilize flows of radioactive wastes of complex composition, which would eliminate chemical methods.

The report by Fernando Rocha with his colleagues from the Portuguese University of Aveiro was devoted to improving the properties of waste-based geopolymers ("Properties Improvement of Metakaolin-Zeolite-Diatomite-Red Mud Based Geopolymers" F. Rocha (&), C. Costa, W. Hajjaji, S. Andrejko-vičová, GeoBioTec, Geosciences Department, University of Aveiro).

Natalia Timonina (IG FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar) reported on the influence of clay minerals of Triassic sandy reservoirs of Arctic regions of the Timan-Pechora oil and gas province on filtration and reservoir properties of the latter, assessment of quality of reservoirs and caps to increase the efficiency of oil recovery and hydrocarbon production.

Reports of BSTU scientists (Valery Lesovik et al.), as well as French colleagues (Gwenn LE SAOUT, Rachida IDIR, Jean Claude ROUX | IMT Mines ALES, Ales, France; CEREMA, DIM project team, Provins, France "Study of a calcium sulfo aluminate cement") raised the problems of applied mineralogy in the building industry.

The report by Olga Frank-Kamenetskaya et al. (Dmitry Vlasov, Vera Rytikova, Vadim Parfenov, Vera Manurtdinova, Marina Zelenskaya | St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; State Museum of Urban Sculpture, St. Petersburg, Russia; St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg) "Monitoring of the state of St. Petersburg stone monu-

ную иммобилизовать радиоактивные отходы сложного состава, что исключает необходимость использовать химические методы.

Доклад Фернандо Роча с коллегами из португальского университета г. Авейро был посвящен улучшению свойств геополимеров на основе отходов («Properties Improvement of Metakaolin-Zeolite-Diatomite-Red Mud Based Geopolymers» F. Rocha (&), C. Costa, W. Hajjaji, S. Andrejko-vičová, GeoBioTec, Geosciences Department, University of Aveiro).

Доклад Натальи Тимониной (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар) был посвящен влиянию глинистых минералов песчаных пород-коллекторов триасового возраста арктических районов Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции на фильтрационные и емкостные свойства последних, оценке качества коллекторов и покрышек с целью повышения эффективности нефтеотдачи пласта и увеличению объемов добычи углеводородов.

Доклады ученых БГТУ (Валерия Лесовика и др.), а также французских коллег (Gwenn Le Saout, Rachida Idir, Jean Claude Roux | IMT Mines ALES, Ales, France; CEREMA, DIM project team, Provins, France «Study of a calcium sulfo aluminate cement») подняли проблемы прикладной минералогии строительной индустрии.

В докладе Ольги Франк-Каменецкой с соавторами (Dmitry Vlasov, Vera Rytikova, Vadim Parfenov, Vera Manurtdinova, Marina Zelenskaya | St. Petersburg State University; State Museum of Urban Sculpture; St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg, Russia) «Monitoring of the state of St. Petersburg stone monuments and the strategy of their preservation» были отражены проблемы, связанные



Shukhov Congress Hall; ICAM Council meeting; Emin Ciftci, Past ICAM President (Stambul, 2012) and Fernando Roche, Vice President of the new staff of the Council

Шуховский конгресс-зал; заседание Совета ICAM Эмин Чифчи, прошлый президент ICAM (Стамбул, 2012) и Фернандо Роче, вице-президент нового состава Совета



Applied mineralogy corresponds to theoretical mineralogy, both of which are important components of mineral science and engineering. It is differentiated from the traditional branch disciplines such as describing mineralogy and history of mineral science. It grew up on the basis of the mutual penetration of mineralogy and related disciplines, the rapid development of modern test and analysis methods, and the practical application of modern industrial and agricultural production and scientific and technological requirements of mineralogy. Combining modern mineralogy with traditional and emerging disciplines such as physics, chemistry, computational simulation, agriculture, biology, mineral processing, metallurgy, materials science and environment, many active interdisciplinary and applied mineralogy branches such as nanomineralogy and computational mineralogy have been formed. Therefore, applied mineralogy is a bridge and link between mineralogy and comprehensive utilization of mineral resources, solid waste recycling and related disciplines. Its rise and development are the inevitable product of modern scientific theory and technological progress, and will continue to play a greater role in industrial and agricultural production, people's daily life and national economy.

Prof. Shiyong Sun,
Director of Department of Geological Engineering of Southwest University of Science and Technology of China



ments and the strategy of their preservation” reflected the problems associated with the preservation of stone monuments in the urban environment: identification of a stone monument, development of methods for monitoring the state of a stone and strategy for stone preservation.

The presentation by Emin Çiftçi, Professor at the Technical University of Istanbul, showed samples of smoky quartz, blue chalcedony, emerald and other semi-precious and precious stones from Turkish deposits. The analytical capabilities of their study were demonstrated. Emin Çiftçi believed that with the increase of scientific knowledge and technical capabilities, gemology as a direction of applied mineralogy was experiencing its golden age (Emin Çiftçi, Haluk Selim, Hüseyin Sendir | Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey; ITICU, Istanbul, Turkey; EOGU, Odunpazar, Eskişehir, Turkey “Authentic semi-precious and precious gemstones of Turkey: special emphasis on the ones preferred for prayer beads”).

Sections worked during three days of the Congress.

The main scientific areas, covered by the Congress, touched on modern methods of the study of rocks and minerals, metallurgy and processing processes, biomineralogy, functional materials, hydrocarbon raw, ecology, in which 9 sections worked, 16 plenary, 70 oral and 36 poster presentations were made. Section T1 “Geometallurgy,

с сохранением памятников в городской среде: идентификация памятников, разработка методов мониторинга состояния камня и стратегии его сохранения.

В презентации профессора Технического университета Стамбула Эмина Чифчи были представлены образцы дымчатого кварца, синего халцедона, изумруда и других полудрагоценных и драгоценных камней из месторождений Турции, продемонстрированы аналитические возможности их исследования. Эмин Чифчи считает, что сегодня с увеличением научных знаний и технических возможностей геммология как направление прикладной минералогии переживает свой золотой век. (Emin Çiftçi, Haluk Selim, Hüseyin Sendir | Istanbul Technical University; ITICU, Istanbul; EOGU, Odunpazar, Eskişehir, Turkey «Authentic semi-precious and precious gemstones of Turkey: special emphasis on the ones preferred for prayer beads»).

Секционные заседания работали в течении трех дней Конгресса. Секция T1 «Геометаллургия, технологическая минералогия и процессы переработки минерального сырья» была самой представительной с акцентом на исследования вещественного состава тонковкрапленных руд цветных и черных металлов. Чувствовалось доминирование комбинированных технологий переработки труднообогатимых руд и промышленных отходов. Большой интерес вызвали докла-

T6. 'Applied mineralogy' of building materials

On a global scale, concrete is by far the most popular building material by volume, about 24Gt/a, or roughly 10km³. The most commonly used binder is Ordinary Portland Cement (OPC), produced by calcination of a mixture of limestone and clay in a rotary kiln at ~1350 °C to form clinker. Nearly 45wt % of the limestone is released as CO₂. Compared to (virgin) building materials like glass, steel, and especially alumium, production of OPC actually emits less CO₂ per unit weight (Hammond & Jones 2008). However, this initial advantage is negated by the annual OPC production amounting to >4Gt (four billion tonnes), of which nearly 80% is produced in south and east Asia, the remainder roughly equally divided over the other continents (2017 data, CemBureau).

Conversely, even when the effect of low-CO₂ emission production methods for OPC-alternatives may be limited if measured per unit weight, the reduction potential is gigantic if sufficient OPC gets replaced by low-CO₂ alternatives.

A number of low-CO₂ emission OPC alternatives have garnered attention from mineralogists in the past decades, eg. involving clays, zeolites, or sulfo-aluminates in the calcination to wholly or partially replace limestone. The starting materials, the details of the metamorphic reactions taking place during clinkering, the clinker products, as well as the hydration reactions and products fresh and aged need characterization in adequate detail, to optimize production (ie. CO₂-reduction potential) as well as performance in real-life structures (eg. hydropower dams, nuclear plants, power lines, roads and railroads, coastal defense works, edifices and residential dwellings).

The understanding of long-term performance of novel OPC-alternative clinker constituents has benefited greatly from research on natural rock analogues, notably naturally combusted impure limestones and other lithologies intercalated with coals seams, long ago ignited by lightning or bush fire.

Another issue (unrelated to cementitious binders) is the spontaneous failure of toughened glass caused by tiny spherical inclusions of nickel-sulfide, contamination from glass production. The included metastable high-temperature polymorph slowly transforms to its stable low-temperature form over 2-10y, depending on detailed chemical composition and formation conditions, expanding some 7vol%. Ultimately, the toughened glass shatters spontaneously but explosively from the internal growing tension, damaging shower doors, salon tables, railway stations, pedestrian passage ways, facades on high-rise buildings, as well as their human users. While improved quality control and post-manufacture heat-treatment have reduced spontaneous breakage cases, better understanding of nickel-sulfide origin and behavior with temperature may still further enhance material use and user safety.

Above topics are just personal favorites from a much, much broader range of topics within 'applied mineralogy of building materials'. Regardless of topic chosen, and irrespective of what advanced instrumentation was used, however, the validity of obtained results can only be verified by specification of all materials, experimental and/or analytical procedures, instrumentation, settings and operating conditions, etc, in adequate detail. There is an unfortunate trend in reporting findings increasingly without such specification, also in prestigious journals. When important details are missing, experiments cannot be repeated, and results not reproduced, representing a demise of science fundamentals.

In summary, there is a clear demand for 'Applied mineralogy' of building materials, whether glass, concrete, alternative cementitious binders, or other materials used in construction, including teaching to students as much as 'outreach to society'.

Dr. Maarten A. T. M. Broekmans, Norway



technological mineralogy, and mineral processing processes” was the most representative with an emphasis on the study of the material composition of finely disseminated non-ferrous and ferrous metals. The combined processing technologies for refractory ores and industrial wastes dominated. The reports on advanced types of ores containing layered and clay minerals were interesting. The reports presented at Section T2 “Industrial minerals, precious stones, ores and mining” demonstrated the importance of applied mineralogy in assessing metals and industrial minerals, precious stones in under fierce competition, raw materials deficit and environmental risks.

Other sections also demonstrated achievements in their fields involving mineralogical researches. It seemed that the trend towards natural minerals and dependence on natural resources would definitely continue. Thus, the importance and popularity of applied mineralogy would increase in the future.

The important result of the Congress was a book of almost 500 pages — Proceedings of the 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019), edited by Professor S. N. Glagolev, Rector of Shukhov Belgorod State Technical University, which were published by Springer (Springer open <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22974-0>), a part of the Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences series.



Shukhov Congress Hall: member of National Program Committee Elena Ozhogina, VIMS, and member of National Organization Committee Natalia Timonina, IG FRC Komi SC UB RAS

Шуховский конгресс-зал: член Национального программного комитета Елена Ожогина, ВИМС и член Национального организационного комитета Наталья Тимонина, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

ды в области исследования перспективных типов руд, содержащих слоистые и глинистые минералы. Доклады, представленные на секции T2 «Индустриальные минералы, драгоценные камни, руды и добыча полезных ископаемых», продемонстрировали важнейшее значение прикладной минералогии при оценке металлов и промышленных минералов, драгоценных камней в условиях жесткой конкуренции, дефицита сырья и экологических рисков.

Остальные секции также демонстрировали достижения в своих областях с привлечением минералогических исследований. Похоже, что использование природных минералов и зависимость от природных ресурсов определенно сохранится. Таким образом, значимость и популярность прикладной минералогии в будущем будет возрастать.

Важным результатом Конгресса стала книга в почти 500 страниц — Труды 14-го Международного конгресса по прикладной минералогии (ICAM2019), под редакцией профессора С. Н. Глаголева, ректора Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, которые были опубликованы в издательстве Шпрингер.

Согласно итогам выпущенного издания и с учетом всех зарегистрированных делегатов в работе Конгресса приняли участие более 400 ученых и специалистов в области прикладной минералогии из 21 стра-



T9: Cultural heritage, artifacts and their preservation

The reports presented in this area covered various problems associated with the conservation of stone monuments in the urban environment: identification of monument stone, the development of methods for monitoring the state of the stone and strategy of stone preservation (Olga Frank-Kamenetskaya, St. Petersburg State University, Russia). In addition, significant attention was paid to the study of stone collections represented in geological and mineralogical museums (Natalia Borovkova, Mining museum of the Mining university, St. Petersburg, Russia) and the problems of archaeological mineralogy: the study of historically important artifacts (Fernando Rocha University of Aveiro, Portugal).

T7: Biomimetic materials on a mineral basis, biomineralogy

The reports presented in this area covered a wide range of fundamental and applied problems of biomineralogy and biomimetic material science. The reports of Russian scientists were devoted to the mechanisms of pathogenic mineral formation in physiological fluids of the human body: in urine (Alina Izatulina, St. Petersburg State University, Russia) and blood (Anatoly

Titov, National Research University, Novosibirsk, Russia). Chinese scientists from Lanzhou Institute of Chemical Physics presented their achievements in creating new biomimetic material: superhydrophobic cobalt blue/clay mineral hybrid pigments with self-cleaning property (Bin Mu), ZnO/palygorskite nanocomposites for antibacterial application (Yuru Kang) and macroporous adsorbent based on montmorillonite (Feng Wang).

Prof. Olga Frank-Kamenetskaya
Dept. of Crystallography St.-Petersburg State University
Vice-president of the St. Petersburg Society of Naturalists



According to the results of the Proceedings and list of all registered delegates, more than 400 scientists and specialists in the field of applied mineralogy from 21 countries of the world (Russia, China, Portugal, Germany, Japan, Turkey, Uzbekistan, France, Chile, Kazakhstan, Australia, Belarus, the USA, Hungary, Spain, Romania, Lebanon, Cote d'Ivoire, Algeria, Italy, Norway) took part in the Congress. The participants were from 46 organizations, 29 delegates were representatives of academic organizations, 44 — higher educational institutions, 23 — representatives of industrial companies, scientific journals, including 8 Academicians of the Russian Academy of Sciences, 4 Corresponding members of RAS, doctors and candidates of sciences, engineers, entrepreneurs, graduate students and master students.

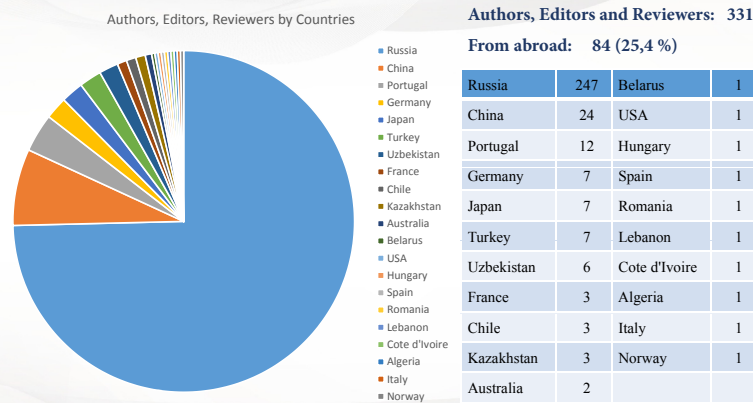
The participants of the Congress were greatly fascinated by the **field trip** to Lebedinsky Processing Plant (the City of Gubkin) — Russian largest enterprise for the extraction and processing of iron ore and production of high-quality iron ore.

The last day of the Congress was marked by the **Scientific School** “Role of Applied Mineralogy in the Study of Industrial Minerals (experience of the RMS Commission for Technological Mineralogy)”. During the Scientific

ICAM2019: Proceedings of the Congress



ICAM2019: Authors, Editors and Reviewers by Countries



ны мира (Россия, Китай, Португалия, Германия, Япония, Турция, Узбекистан, Франция, Чили, Казахстан, Австралия, Беларусь, США, Венгрия, Испания, Румыния, Ливан, Кот д'Ивуар, Алжир, Италия, Норвегия), из 46 организаций. Среди участников были 29 представителей академических организаций, 44 из высших учебных заведений, 23 представителя промышленных компаний, научных журналов, в том числе 8 академиков, 4 чл.-корр. РАН, доктора и кандидаты наук, инженеры, предприниматели, аспиранты и магистранты.

Большой интерес участников Конгресса вызвала **полевая экскурсия** на Лебединский ГОК (г. Губкин) — крупнейшее в России предприятие по добыче и обогащению железной руды и про-

изводству высококачественного железорудного сырья.

В последний день Конгресса работала **научная школа** «Роль прикладной минералогии в исследовании промышленных минералов (опыт работы Комиссии по технологической минералогии РМО)». Во время проведения научной школы профессор Владимир Щипцов — председатель Комиссии по технологической минералогии РМО, заведующий отделом минерального сырья Института геологии КарНЦ РАН — представил развернутый доклад на русском и английском языках об

*The applied mineralogy has always been very important for the study of metals, industrial minerals and precious stones. At the T2 section — **Industrial minerals, precious stones, ores and mineral mining** — it was noted that knowledge is expanding and deepening through the use of modern analytical methods, which allow re-estimating the industrial value of mineral raw.*

Technologies and markets are extremely closely interrelated and changing to search and develop competitive deposits. In a modern situation, strategy and planning in processing technology and mining should keep moving forward. Ultimately, a mineral will be accessible if the problems of geology, mining, processing, economics and ecology are resolved.

Prof. Vladimir Shchiptsov
Chairman of the RMS Commission for Technological Mineralogy, Head of the Department of Mineral Raw at the Institute of Geology of the Karelian SC RAS



School, Professor Vladimir Shchiptsov, Chairman of the RMS Commission for Technological Mineralogy, head of the Mineral Resources Department of the Institute of Geology, Karelia SC RAS, presented a detailed report on the history of technological mineralogy in Russian and English. The speaker drew attention to the prerequisites and reasons for the development of this scientific direction, highlighted the main stages of formation, spoke about the main principles and trends of technological mineralogy today.

The discussion club with the theme “Big data handling in exploration” was led by Dieter Rammlmair (Germany).

The second and fourth floors of BSTU hosted the **exhibition EXPO/ICAM2019** of production equipment, research equipment, and industry software. Participants in the exhibition were: manufacturer of technological equipment NPK Mekhanobr-tekhnika (St. Petersburg), manufacturer of panoramic microscopes SIAMS

group of companies (Yekaterinburg), manufacturer of particle size analyzers Beckman Coulter, USA (representative office in St. Petersburg); software developer «Advanced survey technologies» (Moscow); manufacturer of equipment for determining the chemical and phase composition Thermo Techno (Moscow); Belgorod construction enterprises and manufacturers of building materials, small innovative enterprises of the university, including Komposit company — manufacturer of dry building mixes of the Ecocement brand.

Within the framework of the Congress, a **meeting of the ICAM Council** was held, in which representatives of 11 countries participated. The ICAM Council summed up the work of the Congress (ICAM2019):

- noted the good work of the Congress team (National Organizing Committee, National Program Committee, ICAM Council with support from IMA-CAM), which led to the successful implementation of the ICAM2019 project;

- emphasized the important result of the Congress — Proceedings of the 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019);

- confirmed the decision of the ICAM Council, which was held in 2017 in Italy, Castellaneta Marina (ICAM2017) on the 15th International Congress for Applied Mineralogy in Portugal, University of Aveiro, July 2021;

- designated a new team of the ICAM Council: President — Olga Kotova, Russia, Vice President Fernando Roche, Portugal, Secretary General — Dieter Rammlmair, Germany; the second secretary — Deschentre Chetty, South Africa, and Maarten Broeckmans, IMA/CAM representative for the ICAM Council, Norway.

- based on the results of the competition for the

истории технологической минералогии. Ведущий обратил внимание слушателей на предпосылки и причины развития данного научного направления, выделил основные этапы его формирования, рассказал о главных принципах и тенденциях развития технологической минералогии на сегодняшний день.

Дискуссионный клуб с темой «Обработка больших данных в геологоразведке» (Big data handling in exploration) возглавил Дитер Раммльмайр (Германия).

На втором и четвертом этажах БГТУ работала **выставка EXPO/ICAM2019** производственного оборудования, исследовательской техники, отраслевого программного обеспечения. Участниками выставки стали производитель технологического оборудования НПК «Механобр-техника» (Санкт-Петербург), производитель панорамных микроскопов группа компания «SIAMS» (Екатеринбург), производитель анализаторов размера частиц «Beckman Coulter», США (представительство в Санкт-Петербурге); разработчик программного обеспечения ООО «Современные изыскательские технологии» (Москва); производитель оборудования для определения химического и фазового состава «Термо Техно» (Москва); белгородские строительные предприятия и производители строительных материалов, малые инновационные предприятия университета, в т. ч. ООО «Композит» — производитель сухих строительных смесей марки «Экоцемент».

В рамках Конгресса состоялось **заседание Совета ICAM**, в работе которого приняли участие представители 11 стран. Совет ICAM подвел итоги работы Конгресса (ICAM2019):

- отметил хорошую работу команды Конгресса (Национальный организационный комитет, Национальный программный комитет, Совет ICAM при поддержке от IMA-CAM), что привело к успешной реализации проекта ICAM2019;

- подчеркнул важный результат Конгресса — Труды 14-го Международного конгресса по прикладной минералогии (ICAM2019);

- подтвердил решение Совета ICAM, который проходил в 2017 г. в Италии, Кастелланета Марина (ICAM2017) о проведении 15-го Международного конгресса по прикладной минералогии в Португалии, Университет Авейро в июле 2021 г.;

- определил новый состав Совета ICAM: президент — Ольга Котова (Россия), вице-президент Фернандо Роче (Португалия), генеральный секретарь — Дитер Раммльмайр (Германия), второй секретарь — Дешентре Чети (ЮАР), а также представитель в IMA/CAM от Совета ICAM — Мартин Брукманс (Норвегия).

- по итогам конкурса на право проведения 16-го



Field trip to Lebedinsky processing plant (Gubkin): Ursula E. D. Kelm, Chile, and Corresponding Member of RAS V. V. Maslennikov, Russia

Полевая экскурсия на Лебединский ГОК (г. Губкин): Урсула Е. Д. Кельм, Чили и член-корреспондент РАН В. В. Масленников, Россия



right to host the 16th International Congress for Applied Mineralogy in 2023, Southwest University of Science and Technology, Chengdu, China, was selected. Two countries fought: Chile (Concepcion, Concepcion University) and China (Chengdu, Southwest University of Science and Technology).

Within the **cultural program** of the Congress the participants listened to a magnificent concert of organ music in the Belgorod Philharmonic, took a tour related to the warfare in the Belgorod region during the Second World War, visited places of sightseeing in sunny weather.

The Congress, which motto was “Applied mineralogy: the future is born today”, became an important milestone in the history of the Commission for Applied Mineralogy of the International Mineralogical Association, defined a vector for the development of priority scientific areas, effective links between science and business in the base of the innovative economies of the world's regions, consolidated position of Russia as one of the leading countries in the field of applied mineralogy. We hope that the young participants of the Congress received new knowledge and new opportunities for active participation in the modern challenges of applied mineralogy.

See you in July 2021 in Portugal (University of Aveiro) at the 15th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2021)!

Reference

1. *Prikladnaya mineralogiya: iz Bari v Belgorod* (Applied Mineralogy: from Bari to Belgorod). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2018, No. 4, p. 51.

D. Sc.(geology and mineralogy) O. Kotova

Международного конгресса по прикладной минералогии в 2023 году был выбран Юго-Западный университет науки и технологии, Ченгду, Китай. Боролись две страны: Чили (Консепсьон, Университет Консепсьона) и Китай.

В рамках **культурной программы** участников Конгресса ждал великолепный концерт органной музыки в Белгородской филармонии, экскурсии, связанные с боевыми действиями в период ВОВ, пешие прогулки по достопримечательностям города в солнечную погоду.

Конгресс, девиз которого — «Прикладная минералогия: будущее рождается сегодня», стал важной вехой в истории Комиссии по прикладной минералогии Международной минералогической ассоциации, определил вектор развития приоритетных научных направлений, эффективные связи науки и бизнеса, лежащие в основе инновационной экономики регионов мира, закрепил позиции России как одной из ведущих стран в области прикладной минералогии. Надеемся, что молодые участники Конгресса получили новые знания и новые возможности для активного участия в современных вызовах прикладной минералогии.

До встречи в июле 2021 года в Португалии (Университет Авейру) на 15-м Международном конгрессе по прикладной минералогии (ICAM 2021)!

Литература

1. Прикладная минералогия: из Бари в Белгород // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 4. С. 51.

Д. г.-м. н. О. Котова



ICAM Council delegates after meeting
Делегаты Совета ICAM после заседания



Participants of the Congress at organ music concert in Belgorod Philharmonic
Участники Конгресса на концерте органной музыки в Белгородской филармонии

ICAM HISTORY

Applied mineralogy traditionally develops on the basis of the mutual penetration of mineralogy and related disciplines, the rapid development of analytical methods and experiments, as well as practical application in modern industry, agricultural production, medicine, etc. As a result of combining the achievements of mineralogy with other disciplines (mineral processing, physics, chemistry, biology, computational modeling, metallurgy, materials science, the environment), many active interdisciplinary and applied branches of mineralogy, such as nanomineralogy and biomineralogy, were formed. Thus, the applied mineralogy is an important innovative component in the transition from mineralogy to the integrated use of minerals.

International congresses for applied mineralogy are held by the Commission for Applied Mineralogy within the framework of the International Mineralogical Association (IMA-CAM) to coordinate specialists conducting researches in this field. The Commission was created in 1979 after the formation of the International Council for Applied Mineralogy (ICAM). In 1993, in the city of Perth (Australia), it was decided that ICAM meetings would be held on a four-year schedule between the organizations of the International Congresses of the International Mineralogical Association (IMA). Later, in 2011 in Trondheim (Norway), it was decided to hold congresses every two years.

HISTORICAL OVERVIEW OF PAST ICAM CONGRESSES

Edition	Year	Venue	ICAM President
1 st	1981	Johannesburg, South Africa	S.A. Hiemstra
2 nd	1984	Los Angeles, USA	Donald Hausen
3 rd	1989	Montréal, Canada	Bill Petruk
4 th	1991	Pretoria, South Africa	Sybrand de Waal
5 th	1993	Perth, Australia	Jim Graham
6 th	1996	Warsaw, Poland	Andrzej Szymanski
7 th	2000	Göttingen/Hannover, Germany	Robert B. Heimann
8 th	2004	Aguas de Lindoia, Brazil	Henrique Kahn
9 th	2008	Brisbane, Australia	Ying Gu
10 th	2011	Trondheim, Norway	Maarten A.T.M. Broekmans
11 th	2013	MianYang, China	Faquin Dong
12 th	2015	Istanbul, Turkey	Emin Ciftci
13 th	2017	Bari, Italy	Saverio Fiore
14 th	2019	Belgorod, Russia	Olga Kotova



МИКРОСЕЙСМИЧЕСКАЯ ВАХТА

(60-летию юбилею к. г.-м. н. В. А. Лютоева)

MICROSEISMIC DUTY (60th anniversary)

September 16, 2019 marked Vladimir Lutoev's 60th anniversary. He is Candidate of geological and mineralogical sciences, researcher at the "Syktyvkar" geophysical observatory.

V. Lyutoev studies platform seismicity in the European North-East of Russia and microseismicity. He pays special attention to geoeological problems.

Владимир Алексеевич Лютоев родился 16 сентября 1959 года в селе Керчомъя Усть-Куломского района Коми АССР. Папа — шофер, мама — бухгалтер леспромхоза. Среднюю школу закончил в 1976 г. в поселке Зимстан. Окончив в школу и выбравшись в город, Владимир перепробовал себя в различных учебных заведениях и, в итоге поработав токарем на заводе, поступил на геологический факультет Казанского государственного университета, получил в 1986 году диплом по специальности «Геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых». Обязательные 3 года после окончания университета отработал на Крайнем Севере в поселке Приполярный треста «Коминьфтегеофизика» инженером-геофизиком и начальником партии акустического и радиоактивного каротажа. В 1989 г. с женой и дочерью вернулся в Татарию, поступил на работу в КазТИСиз специалистом инженерной геофизики, проводил изыскания на Елабужском тракторном заводе.

В начале нестабильных 90-х годов вся семья переехала к родителям в п. Зимстан, где Владимир Алексеевич устроился в школу учителем математики.

В 1993 г. он был принят на работу в Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, где строил и налаживал работу геофизической обсерватории «Сыктывкар». В 1994 г. поступил в заочную аспирантуру в Институт геофизики РАН г. Екатеринбурга. В 2001 г. им была защищена диссертация на тему «Сейсмическое районирование Республики Коми и микросейсморайонирование г. Сыктывкара». Полученные теоретические знания В. А. Лютоев успешно использует для решения научно-производственных задач, как на базе классических геофизических изысканий, так и с помощью экспериментальных методик инженерно-сейсмических исследований.

В. А. Лютоевым построена схема сейсморайонирования Республики Коми масштаба 1:2500000 с указанием потенциально активных сейсмогенных зон и вероятными глубинами возможных землетрясений, им разработана методика для изучения местной микросейсмичности и составлена схема микросейсморайонирования г. Сыктывкара в масштабе 1:25000. Проведена типизация грунтов, получены их кинематические и динамические характеристики. В лабора-



торных условиях изучены несущие способности связанных и несвязных грунтов, их отношение к вибрации с определением численных значений критических ускорений (магнитуд). Разработана методика изучения геодинамической активности платформенных структур.

В настоящее время Владимир Алексеевич занимается исследованием платформенной сейсмичности Европейского Северо-Востока России, природно-техногенных процессов инициации микросейсмичности, уделяет особое внимание геозоологическим проблемам. Кроме того, он рассматривает вопросы высотной застройки г. Сыктывкара и набережной р. Сысолы, где изучает динамические характеристики устойчивости грунтов к внешним вибродинамическим нагрузкам.

Владимир Алексеевич делится своим опытом с молодым поколением. Под его руководством была подготовлена одна кандидатская диссертация и пять дипломных работ студентов.

За свой многолетний добросовестный труд и вклад в изучение сейсмичности территории Европейского Северо-Востока России Владимир Алексеевич Лютоев награжден почетными грамотами РАН.

Помимо основной научной и практической деятельности много сил и времени юбиляр отдает обучению детей боевому искусству киокушинкай-каратэ. Он является кандидатом в мастера спорта по каратэ и Всестилевого каратэ, имеет 5 дан. Владимир Алексеевич возглавляет Республиканскую федерацию Всестилевого каратэ, а также является официальным представителем Международной организации каратэ.

Желаем юбиляру многих лет творческой жизни, новых достижений, оптимизма, благополучия, крепкого здоровья!



НА СТРАЖЕ СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ГРАНИЦ

(к 50-летию юбилею работы д. г.-м. н. Т. М. Безносовой)

ON GUARD OF STRATIGRAPHIC BOUNDARY

In September 2019, 50 years have passed since DSc, leading researcher of laboratory of stratigraphy Tatyana Mikhailovna Beznosova joined the Institute of Geology. Tatyana Mikhailovna is a highly skilled specialist in stratigraphy and paleontology of the Lower Paleozoic of the European part of the North-East of Russia.

В сентябре исполнилось 50 лет с момента поступления на работу в Институт геологии Т. М. Безносовой на должность лаборанта в лабораторию палеонтологии. В настоящее время Татьяна Михайловна является доктором геолого-минералогических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории стратиграфии и широко известным специалистом по стратиграфии и брахиоподам ордовика и силура Европейского Северо-Востока России.

Спектр научных интересов Т. М. Безносовой охватывает изучение морфологии, биостратиграфии, палеобиогеографии раннепалеозойских брахиопод и эволюционно-экологические исследования структуры раннепалеозойской биоты. Ее работы охватывают обширную территорию: от разрезов Западного склона Урала до Северного Тимана. На основании изучения ряда опорных разрезов и обширных коллекций брахиопод Тимано-Североуральского региона ею проведены детальные расчленение и корреляция разрезов раннего палеозоя. Исследования 25 полевых сезонов послужили основой для стратиграфических и корреляционных схем верхнего ордовика и силура Русской платформы и Западного склона Урала. Анализ биогеологической истории развития брахиопод в раннем палеозое позволил Т. М. Безносковой обосновать выделение четырех региональных (яренейский, лолашорский, маршрутинский и войвывский горизонты) и двух местных (яптикнырдская и юнкошорская свиты) стратиграфических подразделений в силуре. Впервые установлены, обоснованные палеонтологическими и хемотратиграфическими данными региональная граница ордовика и силура и перерывы в осадконакоплении на рубеже лландовери и венлока и в конце лудлова в разрезах Западного склона Урала. Разработаны зональная схема расчленения Тимано-Североуральских верхнеордовикских и силурийских отложений по брахиоподам и эволюционно-экологическая модель развития основных сообществ брахиопод, на основе которой удалось выявить причинно-следственные механизмы пространственного распределения этой группы



организмов в раннем палеозое на северо-восточной окраине палеоконтинента Балтика.

По материалам собственных палеонтологических и стратиграфических исследований Т. М. Безносовой опубликовано более 180 научных работ. Наиболее выдающимися из них являются крупные монографии «Биостратиграфия и брахиоподы силура европейского Северо-Востока России» (СПб.: Наука, 1994) и «Сообщества брахиопод и биостратиграфия верхнего ордовика, силура и нижнего девона Северо-Восточной окраины палеоконтинента Балтика» (Екатеринбург: Уро РАН, 2007).

Т. М. Безнослова сочетает научную работу организационной и педагогической деятельностью, осуществляя руководство аспирантами и студентами. Под ее руководством защищены шесть дипломных, четыре бакалаврские и одна магистерская работы студентов геологического и химико-биологического направлений Сыктывкарского государственного университета. Прошли обучение в аспирантуре Института геологии с защитой кандидатских диссертаций четыре аспиранта. Т. М. Безнослова является участником и организатором отечественных и зарубежных научных совещаний, конференций и геологических экскурсий (в том числе международных) на разрезы Урала. Она бессменный ответственный секретарь журнала *Вестник*.

Такой огромный труд Татьяны Михайловны не остался незамеченным. Успехи на научном поприще отмечены многочисленными наградами и премиями УрО РАН (1997, 1999), РАН и Профсоюза работников Российской академии наук (2000), Правительства Республики Коми (2007), Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды РК (2016). Татьяна Михайловна является лауреатом премии Правительства Республики Коми в области научных исследований (2008) и носит звание «Почетный деятель науки Республики Коми» (2017).

Ответственный за выпуск:

А. С. Шуйский

Редакторы издательства:

Г. Н. Каблис, О. В. Габова, К. В. Ордин

Компьютерная верстка:

А. Ю. Перетягин