

Комплексные геохронологические и геохимические исследования предположительно импактного циркона древнее 2,8 млрд лет в породах Беломорской эклогитовой провинции

К. А. Докукина, к. г.-м. н.^{1,2}, А. Н. Конилов¹, В. С. Шешуков, к. т. н.¹,
О. И. Окина, к. т. н.¹, К. В. Ван, к. т. н.³

УДК 552.3; 552.4

Методом лазерной абляции с индуктивно связанной плазмой было проведено U-Th-Pb изотопное датирование магматических и метаморфических цирконов, извлеченных из эгирин-содержащих гнейсов в Гридинском меланже Беломорской эклогитовой провинции. Магматические ядра с возрастом 2,89–2,83 млрд лет датируют протолиты. Метаморфические зерна и каймы дали диапазон возрастов 2,80–1,8 млрд лет с пиками ~ 2,80, 2,75, 2,70 и 1,8 млрд лет, отвечающими последовательности тектонометаморфических событий в регионе.

Наряду с типичным цирконом обнаружены зерна с необычными гетерогенными ядрами, в строении которых сочетаются гранулярные, везикулярные и вермикулярные текстуры. В них, по данным спектроскопии комбинационного рассеяния, наблюдаются преобразования от кристаллического до аморфного состояния. Микрогранулированные цирконы интерпретируются как свидетельства мезоархейского импактного события примерно 2,87 млрд лет или древнее.

Ключевые слова: Беломорская эклогитовая провинция, архей, цирконология, изотопный U-Pb возраст, импактный метаморфизм

Введение

В докембрийских полиметаморфических комплексах акцессорный минерал циркон является важным, а порой и единственным минералом-геохронометром, позволяющим установить возраст и последовательность древнейших событий. Помимо абсолютного возраста, строение и состав

циркона иногда позволяют интерпретировать состав, условия формирования и преобразования материнских пород. Циркон способен сохранять свидетельства древних импактных событий даже при воздействии на него более поздних высокотемпературных процессов [1].

Считается, что метеоритные бомбардировки имеют серьезные последствия для формирования поверхностных структур земной коры, атмосферы, климата, развития биоты [2, 3]. Данные о метеоритных ударах в докембрийской истории Земли фрагментарны и в основном уничтожены за счет более поздних тектонических, магматических и эрозионных процессов. Известны три достоверно

¹ Геологический институт РАН, Москва, Россия.

² dokukina@mail.ru.

³ Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка, Россия.

датированные ударные структуры докембрийского возраста: ударная структура Яррабубба в Западной Австралии с возрастом 2229 ± 5 млн лет и ~70 км в диаметре [4]; Купол Вредефорта в Южной Африке с возрастом 2023 ± 4 млн лет [5], >250 км; структура Садбери в Канаде с возрастом 1850 ± 1 млн лет, >200 км [6]. Для Балтийского щита появилась информация для гранофировых норитов массива Ярва-Варака, происхождение которого связывается с импактным событием в палеопротерозое ~2,5 млрд лет [1, 7]. Другие предполагаемые ударные палеопротерозойские структуры имеют либо недостаточно точно установленный возраст, либо косвенные доказательства [8–10].

В настоящей работе представлены первые результаты изучения физических свойств, геохимии и геохронологии цирконов, извлеченных из гнейсов экзотического блока карбонатно-силикатных пород, входящего в обломочную компоненту эклогит-содержащего архейского меланжа Гридинской зоны Беломорской эклогитовой провинции Балтийского щита.

Краткий геологический очерк

Карельский и Кольский палеоконтиненты, состоящие из гранит-зеленокаменных комплексов, вместе с Беломорским аккреционно-коллизийным орогеном являются основными тектоническими единицами восточной части Балтийского щита. Беломорская тектоническая провинция представляет собой сегмент щита северо-западного простирания и характеризуется повторяющимися эпизодами интенсивной деформации и метаморфизма при высоких и умеренных давлениях в течение архея и палеопротерозоя. Керетский тектонический покров на южной окраине Кольского палеоконтинента содержит тоналит-гранодиоритовые (ТТГ) гнейсы и зеленокаменные породы с возрастом протолитов 3,0–2,7 млрд лет. Мезо-неоархейская Беломорская эклогитовая провинция (БЭП), которая имеет простирание более 500 км и ширину около 50 км, содержит сотни эклогитовых тел в ТТГ гнейсах керетской толщи Кольской активной континентальной окраины [11]. История БЭП от протолитов эклогитов (~2,9 млрд лет) до окончательных метаморфических преобразований (~1,9 млрд лет) продолжалась очень долго, приблизительно один миллиард лет. БЭП содержит две ассоциации эклогитов: 1 – образовавшихся в результате субдукции океанической литосферы (ассоциация эклогитов Салмы) и 2 – эклогитизированные дайки основного состава, прорывающие архейские

ТТГ гнейсы – Гридинский рой эклогитизированных даек.

Эклогитовая ассоциация Гридино находится в составе Южно-Кольской активной окраины Кольского палеоконтинента на побережье и прилегающих островах Белого моря. Здесь широко распространены эклогитизированные дайки основного состава: габбро и габброноритов. Метаморфизованные дайки секут эклогит-содержащий мигматизированный архейский меланж, в котором неравномерно распределены многочисленные будины и линзы разнообразного состава и размера. Это эклогиты, гранатовые и безгранатовые амфиболиты, метаморфизованные габброиды, метасульфиды, цоизититы, кианит-гранат-биотитовые гнейсы, кальцифиры и мраморы [12]. Непосредственно в селе Гридино в приливной зоне Белого моря обнажаются экзотические породы, представленные чередованием маломощных прослоев и линз доломитовых силикатных мраморов (кальцифиров) и эгирин-содержащих гнейсов (рис. 1а), исследованию которых посвящена эта работа.



Рис. 1. Полевая фотография обнажения (а): чередование прослоев силикатных доломитовых мраморов и гнейсов. Красные стрелки указывают на поверхности разрывных нарушений и смещения пород, синие – на разлинзованные тела мраморов; микрофотография в проходящем свете, николи параллельны (б) и BSE-имидж (в) эгирин-содержащего гнейса, проба D62-1. Qtz – кварц, аббревиатура остальных минералов по [20]. Длина масштабных линеек 500 мкм

Методы исследования

Минералогия гнейсов

Количественный микроанализ сосуществующих минералов в прозрачно-полированных шлифах после их петрографического исследования проводился в ИЭМ РАН (г. Черноголовка) на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II xmu с энергодисперсионным детектором по методике [13].

Геохимия гнейсов

Определение основных элементов проводили по методике, разработанной в ГИН РАН. Методика предназначена для определения пороодообразующих элементов (натрия, магния, алюминия, кремния, фосфора, калия, кальция, титана, марганца, железа) и микроэлементов в рудах, горных породах, почвах рентгенофлуоресцентным методом с использованием последовательного спектрометра S8 TIGER фирмы Bruker (Германия) и программного обеспечения Spectra-Plus. Для учета матричного эффекта использовались альфа-коэффициенты. В качестве образцов сравнения применяли стандартные образцы (ГСО, ОСО, МСО), близкие по составу к анализируемым пробам. Для построения градуировочных графиков-функций использовалось более 50 стандартных образцов различного состава. Техника подготовки проб к анализу (навеска 10 грамм, истертая до 200 меш.), статистические показатели точности и правильности анализа соответствуют требованиям отраслевых методик НСАМ № 439-РС, НСАМ 451-РС, НСАМ 455-РС МПР РФ. Пределы обнаружения для пороодообразующих элементов – 0,01%, для микроэлементов – 2–5 г/т (ppm).

Определение микроэлементов (редких и рассеянных элементов) проводили на мультиколлекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) Element2 (Thermo Fisher Scientific Inc., Германия) в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН. Погрешность анализа не превышала нормативов по ОСТ 41-08-212-04 (Нормы погрешности при определении химического состава минерального сырья и классификация методик лабораторного анализа по точности результатов). Методики описаны в [13].

Цирконология

Монофракции минералов выделены в лаборатории минералогического и трекового анализа ГИН РАН. Кристаллы цирконов поместили в шайбу из эпоксидной смолы диаметром 25 мм; при полировке шайбы цирконы выводились к поверхности приблизительно на половине толщины, то есть обнажалось их внутреннее содержание. Изображения

(имиджи) в отраженных (BSE) и вторичных (SE) электронах получены на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II xmu (ИЭМ РАН). Для получения цветных катодолюминесцентных изображений (EPMA-CL (tc)-паттернов) цирконов использовали рентгеноспектральный микроанализатор Cameca MS-46 в ИГЕМ РАН, оптическая система которого модернизирована и адаптирована под CCD-цифровую камеру высокого разрешения Videoscanner 285. Методика описана в [14, 15].

Построение элементных карт по цирконам проводилось на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения с катодом Шоттки, оснащенном безазотной системой микроанализа Ultim Max 100 под управлением программного обеспечения AZtec Energy производства Oxford Instruments (Великобритания).

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния на конфокальном микроспектрометре inVia Qontor производства компании Renishaw (Великобритания) изучали кристаллическую структуру ядер цирконов, технические характеристики прибора описаны в [16]. Исследованы пять кристаллов циркона, с получением от двух до семи локальных спектров с поверхности шлифа.

Геохимия циркона

Концентрацию микроэлементов в цирконах определяли в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН с использованием масс-спектрометра Element2 (Thermo Fisher Scientific Inc., Германия) и системы лазерной абляции NWR-213: Nd-YAG (Electro Scientific Ind., США). Пробоотбор проводился в точке с размером пятна 25 и 40 мкм и фактической плотностью энергии на поверхности образца около 4 Дж/см². Транспортировку полученного аэрозоля пробы в плазму осуществляли с помощью гелия. Проводилось измерение изотопов ³¹P, ⁴⁹Ti, ⁸⁸Sr, ⁸⁹Y, ⁹¹Zr, ⁹³Nb, ¹³⁹La, ¹⁴⁰Ce, ¹⁴¹Pr, ¹⁴⁶Nd, ¹⁴⁷Sm, ¹⁵¹Eu, ¹⁵⁷Gd, ¹⁵⁹Tb, ¹⁶³Dy, ¹⁶⁵Ho, ¹⁶⁷Er, ¹⁶⁹Tm, ¹⁷³Yb, ¹⁷⁵Lu, ¹⁷⁷Hf, ¹⁸¹Ta, ²⁰⁸Pb, ²³²Th и ²³⁸U. Для вычисления концентрации микроэлементов использовали циркон 91500 в качестве стандартного образца [17] и ⁹¹Zr в качестве внутреннего стандарта для нивелирования матричных эффектов и поведения определяемых элементов в ходе пробоотбора. Расчет выполняли с помощью программы Glitter [18]. При анализе неоднородного зерна расчет концентрации элементов, для которых были получены максимумы/минимумы сигналов в ходе абляции (т. е. по глубине зерна), проводили отдельно для каждой однородной области с использованием соответствующих интервалов интегрирования, одинаковых для стандартного и рутинного образцов.

Геохронология

U-Th-Pb локальное изотопное датирование цирконов методом МС-ИСП с лазерной абляцией (ЛА-МС-ИСП) выполнено в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН. Для лазерного отбора использовалась система лазерной абляции NWR-213: Nd-YAG (Electro Scientific Ind., США), совмещенная с магнитосекторным масс-спектрометром с ИСП повышенного разрешения Element2 (Thermo Fisher Scientific Inc., Германия). Методика описана в [13].

Результаты исследований

Геологическое строение

Небольшое обнажение карбонатно-силикатных пород находится около уреза воды в селе Гридино (WGS 84: 65°55'17.10"N; 34°40'38.17"E). Несколько уплощенных вытянутых тел доломитовых мраморов чередуются с эгирин- и карбонат-содержащими гнейсами. В работе [19] мраморы трактуются как серия сближенных, крутопадающих ветвящихся жил, мощностью от 0,1 до 0,7 м и протяженностью до 10 м, а гнейсы обозначаются как вмещающие породы. По нашим наблюдениям и гнейсы, и мраморные тела сильно деформированы, смещены по серии хрупких разломов

с формированием ступенчато-блоковых форм с остроконечными окончаниями; маломощные тела мраморов будинируются и растаскиваются внутри гнейсов с формированием системы линз и тонких прослоев (рис. 1а).

Геохимия

Гнейсы имеют кислый состав, натровую специфику, высокую магнезиальность (SiO_2 67,5; Al_2O_3 13,8; TiO_2 0,28; FeO 2,3; MnO 0,08; MgO 3,05; Na_2O 6,98; K_2O 0,48; CaO 2,75; P_2O_5 0,11; Sr 0,07; BaO 0,09; S 0,03; потери при прокаливании 2,06 масс.%).

Петрография

Гнейсы состоят из кислого плагиоклаза (альбита), кварца с включениями полиминеральных агрегатов эгирина, амфибола, кальцита, титанита, эпидота, биотита, калиевого полевого шпата, ильменита, магнетита, апатита и циркона (рис. 1б, в).

Геохронология

Из силикатных мраморов извлечено 12 мелких зерен циркона, датировать их не удалось. Напротив, из гнейсов выделено большое количество кристаллов циркона, которые по своим микроскопическим

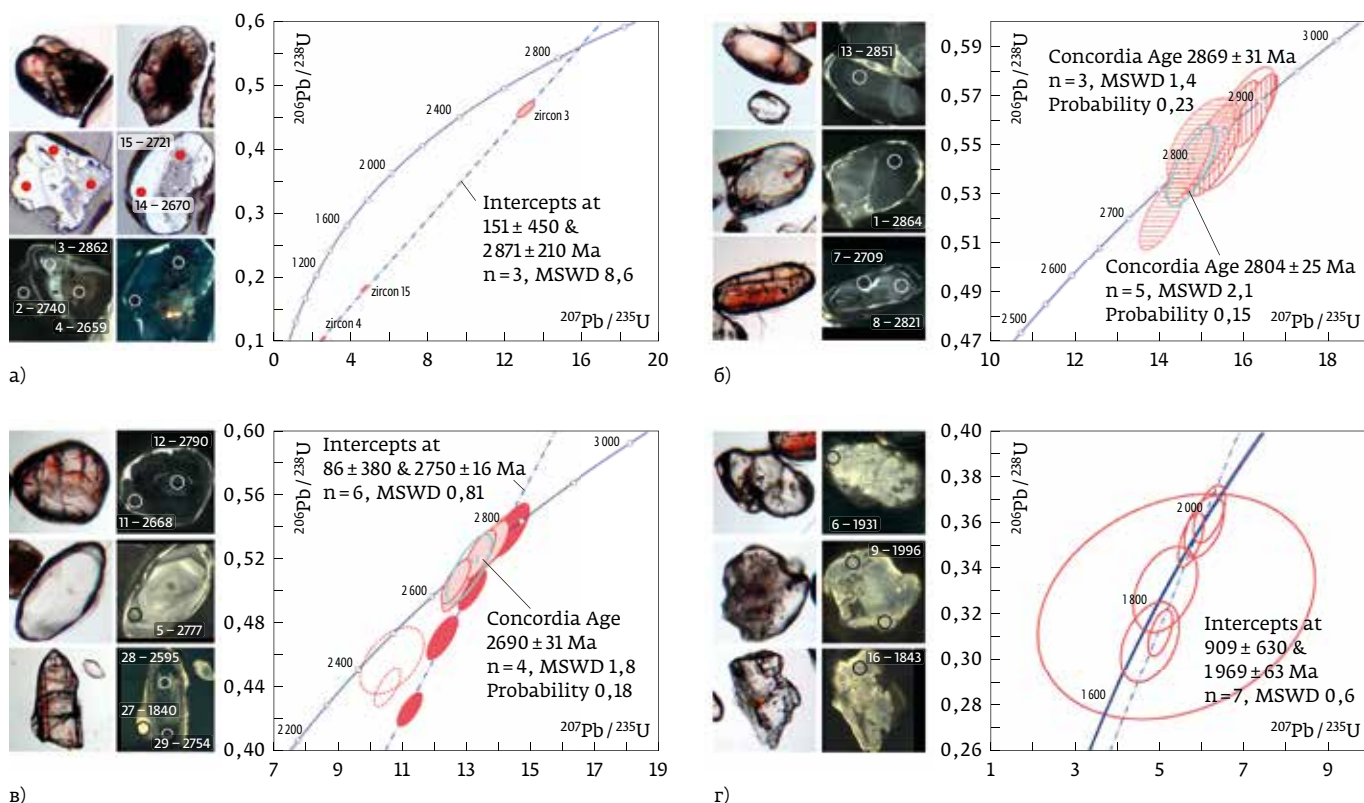


Рис. 2. Микрофотографии в скрещенных николях, BSE-имиджи, EPMA-CL (tc) паттерны цирконов разных популяций в пробе D62-1 и соответствующие им (популяциям) диаграммы с конкордией

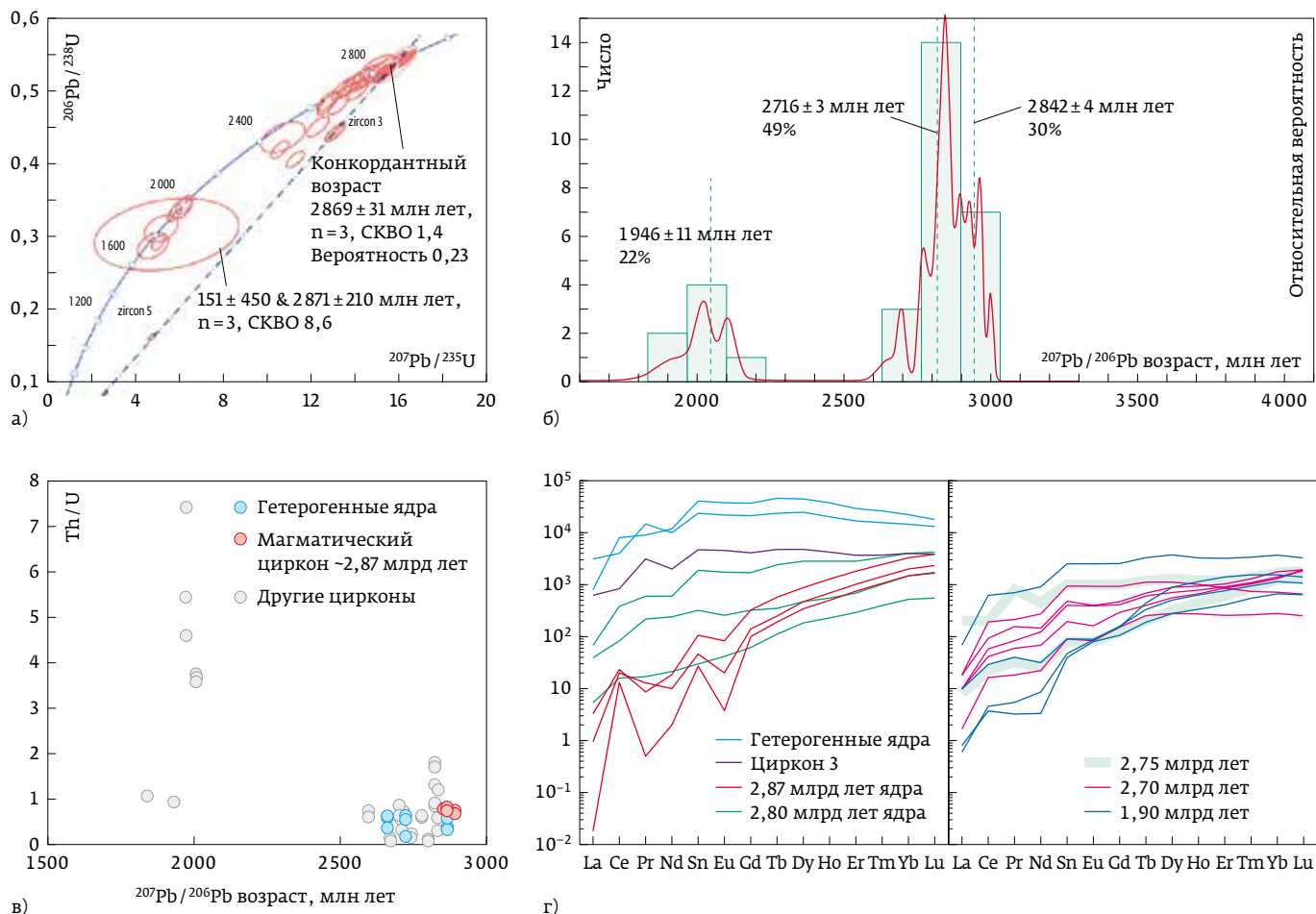


Рис. 3. Обобщенные результаты Th-U-Pb датирования и геохимии цирконов из эцирин-содержащих гнейсов, проба D62-1. а – диаграмма с конкордией для всех полученных значений возраста (40 определений); б – гистограмма $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастов; в – Th/U-отношения в цирконах с $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастaми; г – спектры редкоземельных элементов в изученных цирконах, хондрит по [21]

и кристаллохимическим свойствам формируют несколько популяций архейских и палеопротерозойского возрастов (рис. 2, 3).

Структурно самыми древними в цирконе оказались темно-коричневые в проходящем свете гетерогенные ядра (рис. 2а), представленные неоднородным агрегатом варьирующего по составу циркона с включениями кварца, магнетита, апатита, аллана, монацита и альбита. Структура гетерогенных ядер в разной степени сочетает гранулярные, везикулярные и вермикулярные текстуры.

Гранулярный (или гранулированный) циркон представлен отдельными мелкими (до 5 микрон) неоднородными по составу округлыми или угловатыми гранулами циркона, которые разобщены в кварцевом матриксе или соприкасаются друг с другом (рис. 4). Везикулярные (пузырчатые) формы характеризуют округлые выделения зонального по

составу циркона, иногда они содержат включения кварца и/или апатита (рис. 4а). Вермикулярные

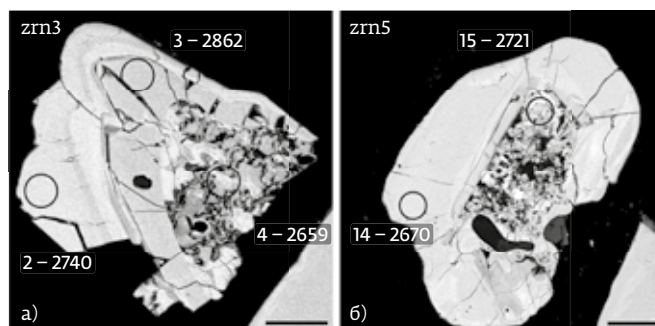


Рис. 4. BSE-измиджи цирконов с гетерогенными ядрами, проба D62-1: а – циркон, зерно 3 (Zrn3); б – циркон, зерно 5 (Zrn5). Длина масштабных линеек 50 мкм

(червеобразные) текстуры представлены тонкими микронными «рябыми» срастаниями циркона и кварца (рис. 4б). EPMA-CL (tc)-паттерны таких областей имеют бурый неоднородный цвет (рис. 2а). На BSE-изображениях и картах распределения элементов гетерогенные ядра контрастно выделяются неоднородным строением и характеризуются обогащением Y, Hf, Fe, Ca, Mg, Al (рис. 5) и дают дискордантные неоархейские ($2,87 \pm 0,21$ млрд лет) значения возраста (рис. 2а). Гетерогенные ядра имеют плоские спектры нормированных на хондрит редкоземельных элементов ($\Sigma\text{REE} = 34138\text{--}55853$ ppm) без выдержанных цериевой и европиевой аномалий ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,94\text{--}0,99$; $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,62\text{--}3,16$) (рис. 3г).

Гетерогенные ядра окружены внешней светлой в EPMA-CL (tc) оторочкой, которая по содержанию редких и рассеянных элементов очень схожа с составами циркона в гетерогенных ядрах (рис. 3г). Гетерогенные ядра и светлая оторочка дали дискордию с верхним пересечением около 2,87 млрд лет (рис. 3а).

Светло-коричневые удлиненные сглаженные зерна или унаследованные ядра в EPMA-CL (tc) демонстрируют грубую секториальную или осцилляторную (магматическую) зональность и имеют $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ мезоархейский возраст 2,89–2,83 млрд лет (рис. 3а). Для данной популяции также характерно нормальное «магматическое» распределение редкоземельных элементов ($\Sigma\text{REE} = 833\text{--}7160$ ppm, $\text{Lu}_\text{N}/\text{La}_\text{N} = 211\text{--}101190$, $\text{Lu}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N} = 19\text{--}66$), высокие Th/U отношения, отрицательная европиевая ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,3\text{--}0,8$) и положительная цериевая аномалии ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 1,5\text{--}129$) (рис. 3г). Магматические цирконы характеризуются вариациями по содержанию Th (10–160 ppm), U (18–225 ppm), величины Th/U-отношения (0,6–1,32) (рис. 3в). Оценка температуры кристаллизации циркона (без учета циркона 3 с повышенным содержанием титана) по Ti-in-Zrn геотермометрам [22, 23] дает значения 726–798 °C.

Серые бесструктурные в EPMA-CL (tc) и небольшие округлые зерна лежат в диапазоне возрастов

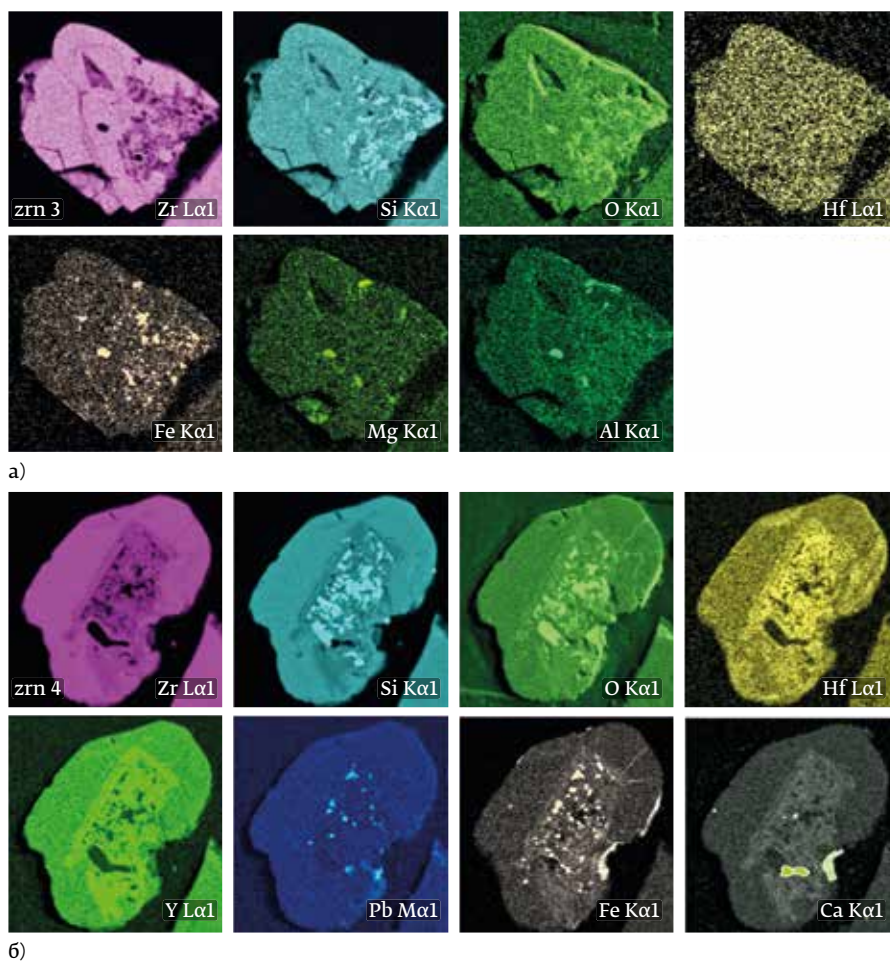


Рис. 5. Карты распределения элементов в цирконах с гетерогенными ядрами: (а) Zrn3; (б) Zrn5

2,8–2,69 млрд лет (рис. 2б, в); они наследуют стиль REE-спектров при снижении концентрации редкоземельных элементов (рис. 3г) ($\Sigma\text{REE} = 275\text{--}3747$ ppm). Цирконы с возрастом ~2,8 млрд лет характеризуются повышенными Th/U отношениями (0,32–1,81), тогда как остальные неоархейские цирконы имеют Th/U отношения (0,22–0,87) (рис. 3в). В цирконах этой популяции встречаются включения кианита, кварца, биотита, апатита, альбита, галенита, кальцита.

Прозрачные в проходящем свете и желтые в EPMA-CL (tc) тонкие каймы циркона (рис. 2в) и небольшие зерна, которые содержат многочисленные включения кварца, эгирина, кальцита и редкие рутила и полевого шпата (рис. 2г), характеризуются очень высокими Th/U отношениями (0,94–5,44) и имеют $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст в диапазоне 2,0–1,84 млрд лет (рис. 3б).

В большинстве зерен почти независимо от их возраста содержание легких, несовместимых (REE, Y и других) элементов заметно варьирует по

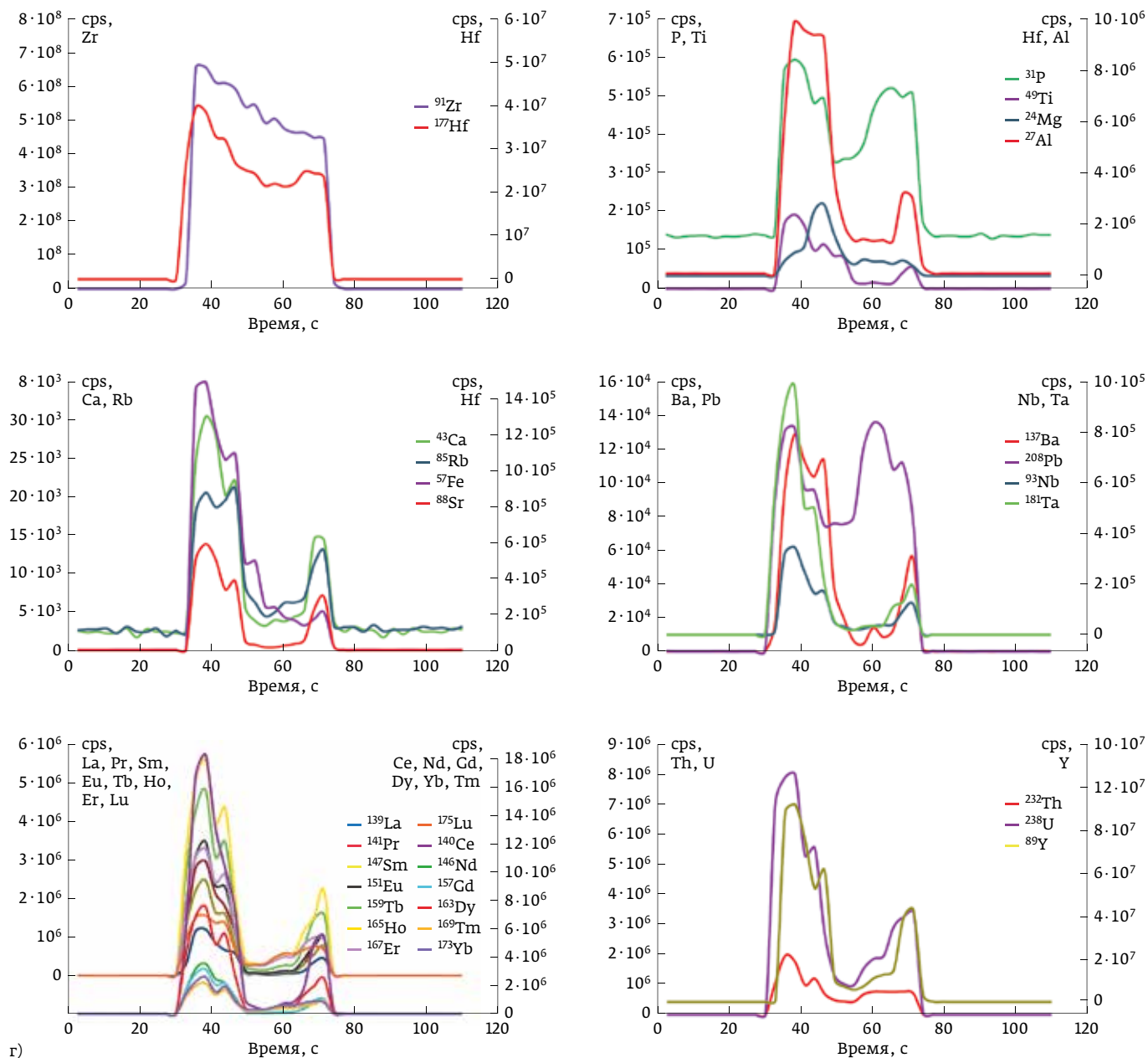
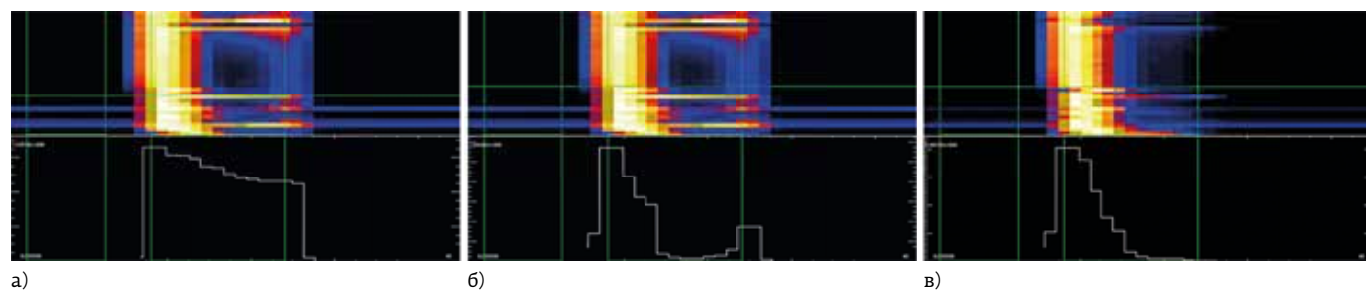


Рис. 6. Графики изменения сигналов, полученных при абляции зерен циркона пробы D62-1, в зависимости от времени (глубины) абляции. Спектры, характеризующие изменение интенсивности сигналов для элементов, полученные в программе Glitter [18]: а – нормальный спектр; б, в – аномальные спектры; г – конкретный пример изменения сигналов в цирконе, зерно 3

количеству от нулевых значений до нескольких десятков, сотен или тысяч ppm. Это удобно продемонстрировать на графиках изменения сигналов (LA-ICP-MS time-resolved spectra) при углублении кратера абляции в точке анализа (рис. 6). При нормальном распределении сигналов Zr, Y, Hf и в большинстве случаев тяжелых REE с уменьшением сигнала со временем абляции (рис. 6а), сигналы легких REE, а также некоторых петрогенных и литофильных элементов показывают контрастную интенсивность в разных частях спектра (аномальные спектры на рис. 6б, в). При расчете таких результатов отдельными интервалами составы каждого значительно отличаются (рис. 6г). Наиболее однородными по составу оказались цирконы с возрастом ~2,7 млрд лет. В большинстве цирконов присутствуют заметные содержания несовместимых элементов, петрогенных Fe, Ca и литофильных Ba, Rb, Sr.

Обсуждение

Генезис циркона

Гетерогенные ядра. Наибольший интерес вызывают древние гетерогенные ядра циркона (рис. 2, 4), которые представлены гранулированными, неоднородными по составу зернами. С целью определения кристалличности и фазового состава минералов в агрегате ядер проведена спектроскопия комбинационного рассеяния (КР), результаты приведены на рис. 7. По данным КР-спектроскопии степень кристалличности изученных цирконов изменяется от идеальной решетки до полностью аморфной: линии спектра уширяются, их интенсивность падает вплоть до исчезновения, «особые» линии ν_1 и ν_3 (~970 и ~1000 cm^{-1}) сдвигаются навстречу и сливаются. Разрушение кристаллической структуры циркона объясняется двумя механизмами: 1 – импактный метаморфизм [24, 25]; 2 – радиационное повреждение (radiation damage) [26]. В первом случае существенные различия в степени кристалличности в пределах одного зерна можно объяснить кинетическими причинами, например размерностью микрогранул, слагающих ядра цирконов. При втором сценарии степень метамиктности цирконов зависит от полученной дозы радиоактивного облучения. Кажется маловероятным, что внутри ядра Zrn могли быть контрастные по степени радиоактивности участки. С другой стороны, из литературы известно, что при метеоритном ударе в таких минералах, как циркон или кварц, помимо фазовых превращений, возможно образование систем планарных дислокаций [6, 27]. Однако, в изученных нами цирконах этого не наблюдается. Очевидно, это связано с тем, что

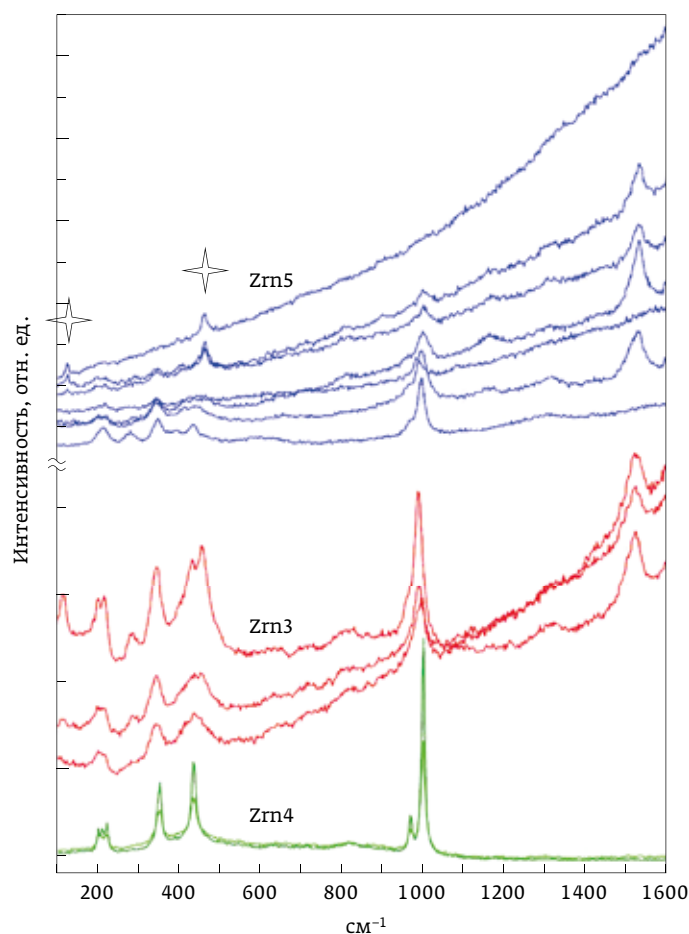


Рис. 7. Спектры комбинационного рассеяния (raw-спектры) в гетерогенных ядрах цирконов. В зерне Zrn3 – красные линии, в зерне Zrn5 – синие линии. Для сравнения типичный спектр циркона (Zrn4) представлен на примере зерна из популяции палеопротерозойского возраста в зерне 4 – зеленые линии. Звездочками отмечены линии кварца (~120 и 464 cm^{-1}). Лазер $\lambda = 532 \text{ nm}$

по цирконам сформировались постимпактные оболочки. Помимо циркона, полиморфы кремнезема, такие как коэсит и стишовит, также являются индикаторами шокового метаморфизма пород-мишеней метеоритных кратеров [28]. Как следует из рис. 7 на КР-спектрах присутствуют линии кварца; но SiO_2 -индикаторов ударного метаморфизма в ядрах циркона пока не обнаружено.

Структуры, диагностируемые в гранулированных гетерогенных ядрах, более всего напоминают структуры, сформированные из импактного расплава, формирующиеся при ударном метаморфизме. Гранулярно-текстурированный циркон, представленный агрегатом субмикронных необластов, часто присутствует в составе пород, модифицированных

при импактном метаморфизме [5, 6, 29, 30]. Гранулированный циркон интересен для изучения ударного метаморфизма, поскольку считается, что он представляет собой наиболее ударно-интенсивный морфотип циркона, образующийся в результате перекристаллизации диаплектического стекла $ZrSiO_4$ в новообразованные домены (необласты) в условиях, превышающих 50 ГПа [24]. Другие гранулярные текстуры представляют собой перекристаллизованный аморфный $ZrSiO_4$ и реидит (reidite – редкий полиморф $ZrSiO_4$, сформированный при больших давлениях и температурах и обнаруженный в импактных кратерах), которые превратились в циркон. Везикулярные текстуры также напоминают текстуры дегазации и оплавления, которые описаны в цирконах, сформированных из импактных расплавов [6, 24, 31, 32]. Вермикулярные срастания циркона и кварца подобны продуктам ударного метаморфизма, сформированным при сверхвысокотемпературном разложении циркона с формированием вермикулярных срастаний SiO_2 и ZrO_2 , например [33]. В изученных вермикулярных текстурах внутри гетерогенных ядер свободный ZrO_2 (бадделейт) пока не диагностирован, однако этот минерал быстро превращается обратно в циркон уже при девитрификации импактных расплавов [24].

Таким образом, поликристаллические гранулярные, везикулярные и вермикулярные текстуры в составе древних гетерогенных ядер цирконов изученных гнейсов могут быть унаследованным отпечатком мезоархейского импактного события (2,87 млрд лет или древнее) и формирования диаплектитовых расплавов с высокотемпературной перекристаллизацией и разложением первичного циркона. В таком случае однородная мезоархейская оторочка гетерогенного ядра с $^{207}Pb/^{206}Pb$ возрастом 2862 млн лет (точка 3, рис. 4а), которая по содержанию редких и рассеянных элементов очень схожа с составами циркона в гетерогенных ядрах, может рассматриваться как хронометр пост-импактного события и, возможно, образовалась при эпитаксиальном обрастании в момент аморфного состояния вещества [34].

Мезоархейский магматический циркон с возрастом ~ 2,87 млрд лет. Циркон с $^{207}Pb/^{206}Pb$ возрастом 2,89–2,82 млрд лет (2869 ± 31 млн лет) (рис. 2б) по строению, геохимическим признакам и усредненной температуре формирования ~760 °C наиболее соответствует циркону магматического генезиса (рис. 3г), сформированного из кислых магм [35, 36], и, по-видимому, отвечает возрасту магматических протолитов пород.

Цирконы с возрастом 2,8–1,9 млрд лет характеризуются неоднородностью состава и наследуют нетипичные для циркона плоские REE-спектры, характерные для гетерогенных ядер. Форма REE-спектров наследуется для всех возрастов, однако их валовое содержание снижается с омоложением возраста циркона. Цирконы с возрастом 2,8 и 1,9 млрд лет характеризуются высокими Th/U-отношениями, особенно выделяются аномальные значения Th/U-отношения в цирконах с возрастом 1,9 млрд лет (рис. 3в) при очень низких валовых содержаниях Th и U. Состав цирконов этого возрастного диапазона очень неоднородный, характеризуется большим количеством примесей несовместимых элементов, что может быть связано как с наличием в цирконе микроскопических минеральных включений, так и со значительными колебаниями состава самого циркона. На дискриминационных диаграммах [37] составы циркона этого возрастного интервала занимают промежуточную позицию между магматическим и гидротермальными типами циркона. Возрастные пики на гистограмме (рис. 3б) в целом совпадают с основными возрастными пиками эволюции Беломорской эклогитовой провинции и отражают последовательность тектоно-метаморфических событий.

Заключение

Цирконы эгирин- и кальцит-содержащих гнейсов несут в себе информацию о событиях мезо-неоархейского и палеопротерозойского возраста.

Древнейшие магматические цирконы с возрастом ~2,87 млрд лет отвечают возрасту кристаллизации гранитоидных протолитов.

Гетерогенные ядра с возрастом 2,87 млрд лет или древнее скорее всего сформировались при перекристаллизации древнего циркона из диаплектитовых расплавов, возникших при импактном метаморфизме пород кислого состава. Импактная природа циркона пока установлена по аналогии со структурами импактно-модифицированного циркона из известных и доказанных метеоритных кратеров. Для более серьезных доказательств требуются дополнительные инструментальные исследования, чтобы диагностировать реликты минералов-индикаторов шоковых преобразований, например, реидит (либо промежуточный высокобарический низкосимметричный HPLS-полиморф $ZrSiO_4$ [38]), бадделейт, высокобарические полиморфы SiO_2 . Не исключено, что эти исследования не дадут ожидаемый результат, поскольку последующие после импакта процессы могли уже стереть все такие индикаторы.

Метаморфогенные каймы и зерна циркона возрастного диапазона 2,8–1,9 имеют возрастные пики, которые отражают последовательность тектоно-метаморфических событий в Беломорской эклогитовой провинции.

Благодарности

Исследования проведены по государственному заданию ГИН РАН (FMMG-2023-0007).

Литература / References

- Kaulina T. V., Nerovich L. I., Il'chenko V. L., Lialina L. M., Kunakkuzin E. L., Gannibal M. A., Mudruk S. V., Elizarov D. V., Borisenko E. S. Astroblems in the early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic shield). In: Geological and Geo-Environmental Processes on Earth (A. K. Shandilya, V. K. Singh, S. C. Bhatt, C. S. Dubey, Eds.) Springer, 2021, pp. 25–37. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_3
- Kring D. A. Environmental consequences of impact cratering events as a function of ambient conditions on Earth. *Astrobiology*. 2003; 3:133–152. <https://doi.org/10.1089/15311070321632471>
- Glikson A. Y., Vickers J. Asteroid impact connections of crustal evolution. *Australian Journal of Earth Sciences*. 2010; 57:79–95. <https://doi.org/10.1080/08120090903416211>
- Erickson T. M., Kirkland C. L., Timms N. E., Cavosie A. J., Davison T. M. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognised meteorite impact structure. *Nature Communications*. 2020; 11(1):300. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13985-7>
- Kamo S. L., Reimold W. U., Krogh T. E., Colliston W. P. A 2.023 Ga age for the Vredefort impact event and a first report of shock metamorphosed zircons in pseudotachylitic breccias and granophyre. *Earth and Planetary Science Letters*. 1996; 144:369–387. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(96\)00180-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(96)00180-X)
- Krogh T. E., Kamo S. L., Bohor B. F. Shock Metamorphosed Zircons with Correlated U-Pb Discordance and Melt Rocks with Concordant Protolith Ages Indicate an Impact Origin for the Sudbury Structure. In: Earth Processes: Reading the Isotopic Code (A. Basu, S. Hart, Eds.). AGU, Washington, D.C., 1996, Geophysical Monograph Series, V.95, pp. 343–353. <https://doi.org/10.1029/GM095p0343>
- Nerovich L. I., Kaulina T. V., Bayanova T. B., Il'chenko V. L., Gannibal M. A., Kunakkuzin E. L., Bazai A. V., Mudruk S. V., Borisenko E. S., Sosnovskaya M. A. Granophyre Norites and Diorites of the Jarva-Varaka Massif (Monchegorsk Ore Area, Kola Region, Russia): Geology, Petrography, Geochemistry, Geochronology and Origin. *Geochemistry International*. 2023; 61(6): 572–592. <https://doi.org/10.1134/S0016702923060071>
- Pati J. K., Qu W. J., Koeberl C., Reimold W. U., Chakarvorty M., Schmitt R. T. Geochemical evidence of an extraterrestrial component in impact melt breccia from the Paleoproterozoic Dhalu impact structure, India. *Meteoritics & Planetary Science*. 2017; 52: 722–736. <https://doi.org/10.1111/maps.12826>
- Reimold W. U., Ferrière L., Deutsch A., Koeberl C. Impact controversies: impact recognition criteria and related issues. *Meteoritics & Planetary Science*. 2014; 49: 723–731. <https://doi.org/10.1111/maps.12284>
- Mashchak M. S., Naumov M. V. The Suavjärvi impact structure, NW Russia. *Meteoritics & Planetary Science*. 2012; 47: 1644–1658. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01428.x>
- Mints M. V., Dokukina K. A., Konilov A. N. The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province: Tectonic position and geodynamic evolution. *Gondwana Research*. 2014; 25:561–584. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.11.010>
- Володичев О. И., Слабунов А. И., Бибикина Е. В., Конилов А. Н., Кузенько Т. И. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит. *Петрология*. 2004; 6: 609–631.
Volodichev O. I., Slabunov A. I., Bibikova E. V., Konilov A. N., Kuzenko T. I. Archean eclogites in the Belomorian mobile belt, Baltic Shield. *Petrology*. 2004; 12(6):540–560.
- Конилов А. Н., Шешуков В. С., Пожиленко В. И., Ван К. В., Бондаренко Г. В., Голованова Т. И., Ермолаев Б. В., Дубенский А. С., Понкратов К. В., Шкляр Н. Е. Цирконология и возраст Fe-Ti-эклогитов Беломорской провинции. *Аналитика*. 2020; 10(5): 386–402. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2020.10.5.386.402>
Konilov A. N., Sheshukov V. S., Pozhilenko V. I., Van K. V., Bondarenko G. V., Golovanova T. I., Ermolaev B. V., Dubensky A. S., Ponkratov K. V., Shklyar N. E. Zirconology and Age of the Fe-Ti Eclogites from Belomorian Province. *Analytics*. 2020; 10(5): 386–402. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2020.10.5.386.402>
- Конилов А. Н., Голованова Т. И., Понкратов К. В. Аллюмосиликатное стекло старше 1,9 млрд лет и его свойств. По данным исследования методами истинной катодолюминесценции и спектроскопии комбинационного рассеяния. *Аналитика*. 2016; 6(4): 114–122. https://www.j-analytics.ru/files/article_pdf/5/article_5611_319.pdf
Konilov A. N., Golovanova T. I., Ponkratov K. V. Aluminosilicate glass over 1.9 ga of age and its properties insights from true-color cathodoluminescence and Raman spectroscopy. *Analytics*. 2016; 6(4): 114–122. https://www.j-analytics.ru/files/article_pdf/5/article_5611_319.pdf
- Новиков И. А., Грибоедова И. Г., Голованова Т. И. Интерпретация паттерна катодолюминесценции на примере фторапатита космических массивов Кондер (Алдан). *Аналитика*. 2017; 7(1): 88–97. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2017.32.1.88.106>
Novikov I. A., Griboedova I. G., Golovanova T. I. Interpretation of cathodoluminescence patterns by the example of fluorapatites from Kondyor koswites (Aldan shield). *Analytics*. 2017; 7(1): 88–97. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2017.32.1.88.106>
- Конилов А. Н., Пожиленко В. И., Ван К. В., Голованова Т. И., Пронина Н. В., Шкляр Н. Е., Понкратов К. В. Исследование эклогитов Беломорской провинции современными аналитическими методами. *Аналитика*. 2018; 8(4):364–375. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2018.41.4.364.375>
Konilov A. N., Pozhilenko V. I., Van K. V., Golovanova T. I., Pronina N. V., Shklyar N. E., Ponkratov K. V. Study of eclogites from the Belomorian province by using of modern analytical methods. *Analytics*. 2018; 8(4):364–375. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2018.41.4.364.375>
- Wiedenbeck M. P. A., Corfu F., Griffin W. L., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J. C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 1995; 19: 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
- Van Achterbergh E., Ryan C. G., Jackson S. E., Griffin W. L. Data reduction software for LA-ICP-MS: appendix. In: (Sylvester P. J., Ed.), Laser Ablation-ICP-Mass Spectrometry in the Earth Sciences: Principles and Applications. *Mineralogical Association of Canada (MAC)*, Ottawa, Ontario, Canada. 2001, Short Course Series, V.29, pp. 239–243.
- Lokhov K. I., Sibelev O. S., Slabunov A. I., Bogomolov E. S., Prilepsky E. B. Endogenous and sedimentary carbonate rocks from the Belomorian province: new geochemical, isotopic and geochronological data. *Geochemistry of Magmatic Rocks. Abstracts of XXVI International conference "Geochemistry of Alkaline rocks"*. Moscow: GEOKHI RAS Publ. 2009, p. 93–94.
- Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*. 2010; 95: 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: (Saunders A. D., Norry M. J., Eds.). *Magmatism*

- in the Ocean Basins. *Geological Society*, London, 1989, Special Publications, V.42, pp.313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.1>
22. **Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B.** Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2006; 151: 413–433. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>
 23. **Ferry J. M., Watson E. B.** New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2007; 154: 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
 24. **Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R. T., Stöffler D.** Shock-metamorphosed zircon in terrestrial impact craters. *Meteoritics & Planetary Science*. 2006; 41(3): 433–454. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2006.tb00472.x>
 25. **Li S.-S., Keerthy S., Santosh M., Singh S. P., Deering C. D., Satyanarayanan M., Praveen M. N., Aneeshkumar V., Indu G. K., Anilkumar Y., Sajinkumar K. S.** Anatomy of impactites and shocked zircon grains from Dhala reveals Paleoproterozoic meteorite impact in the Archean basement rocks of Central India. *Gondwana Research*. 2018; 54:81–101. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.10.006>
 26. **Zhang M., Salje E. K. H., Farnan I., Graeme-Barber A., Daniel P., Ewing R. C., Clark A. M., Leroux H.** Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2000; 12(8): 1915–1925.
 27. **Zamyatin D. A.** Application of Raman Spectroscopy for Studying Shocked Zircon from Terrestrial and Lunar Impactites: A Systematic Review. *Minerals*. 2022; 12(8):969. <https://doi.org/10.3390/min12080969>
 28. **Miyahara M., Tomioka N., Bindi L.** Natural and experimental high-pressure, shock-produced terrestrial and extraterrestrial materials. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2021; 8:59. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00451-6>
 29. **Bohor B. F., Betterton W. J., Krogh T. E.** Impact-shocked zircons: Discovery of shock-induced textures reflecting increasing degrees of shock metamorphism. *Earth and Planetary Science Letters*. 1993; 119: 419–424. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(93\)90149-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(93)90149-4)
 30. **Herrmann M., Kenny G. G., Martell J. N., Whitehouse M. J., Alwmark C.** The first U–Pb age for shocked zircon from the Mien impact structure, Sweden, and implications for metamictization-induced zircon texture formed during impact events. *Meteoritics & Planetary Science*. 2024; 59(1): 211–241. <https://doi.org/10.1111/maps.14116>
 31. **Corfu F., Hanchar J. M., Hoskin P. W. O., Kinny P.** Atlas of zircon textures. In: Zircon (Hanchar J. M., Hoskin P. W. O., Eds.) *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Mineralogical Society of America. 2003; 53(16): 469–500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
 32. **Hauser N., Reimold W. U., Cavosie A. J., Crosta A. P., Schwarz W. H., Tieloff M., De Souza C. D. S. M., Pereira L. A., Rodrigues E. N., Brown M.** Linking shock textures revealed by BSE, CL, and EBSD with U–Pb data (LA-ICPMS and SIMS) from zircon from the Araguinha impact structure, Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*. 2019; 54(10): 2286–2311. <https://doi.org/10.1111/maps.13371>
 33. **Cavosie A. J., Timms N. E., Erickson T. M., Hagerty J. J., Hörz F. P.** Transformations to granular zircon revealed: Twinning, reidite, and ZrO₂ in shocked zircon from Meteor Crater (Arizona, USA). *Geology*. 2016; 44: 703. <https://doi.org/10.1130/G38043.1>
 34. **Ewing R. C., Wang L., Meldrum A., Weber W. J., Corrales L. R.** Radiation effects in zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Mineralogical Society of America. 2003; 53: 387–425. <https://doi.org/10.2113/0530387>
 35. **Rubatto D.** Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*. 2002; 184: 123–138. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2)
 36. **Hoskin P. W. O., Schaltegger U.** The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Zircon (Hanchar J. M., Hoskin P. W. O., Eds.) *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Mineralogical Society of America. 2003; 53: 27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>

37. **Hoskin P. W. O.** Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005; 69: 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006>
38. **Mihailova B., Waesermann N., Stangarone C., Angel R. J., Prencipe M., Alvaro M.** The pressure-induced phase transition(s) of ZrSiO₄: revised. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2019; 46: 807–814. <https://doi.org/10.1007/s00269-019-01041-1>

Авторы / Authors

Докукина Ксения Александровна, к. г. - м. н. ведущий научный сотрудник Геологического института РАН, Москва. Область научных интересов: метаморфизм и тектоника раннего докембрия.

Dokukina Ksenia Aleksandrovna, Ph.D., leading researcher at the Geological Institute RAS, Moscow. Research interests: metamorphism and tectonics of the Early Precambrian.
dokukina@mail.ru
ORCID 0000-0002-1007-5909

Конилов Александр Николаевич, старший научный сотрудник Геологического института РАН, Москва. Область научных интересов: петрология и минералогия метаморфических пород. Konilov Aleksandr Nikolaevich, senior researcher at the Geological Institute RAS, Moscow. Research interests: petrology and mineralogy of metamorphism.
chalma@bk.ru
ORCID 0000-0002-9750-3573

Шешуков Виктор Степанович, к. т. н., ведущий научный сотрудник Геологического института РАН, Москва. Область научных интересов: изотопия и масс-спектрометрия неорганических материалов. Sheshukov Viktor Stepanovich, Ph.D., leading researcher at the Geological Institute RAS, Moscow. Research interests: isotopy and mass-spectrometry of inorganic matters.
r.vssh@yandex.ru
ORCID 0000-0001-9311-8849

Окина Ольга Ильинична, к. т. н., ведущий научный сотрудник Геологического института РАН, Москва. Область научных интересов: изотопия и масс-спектрометрия неорганических материалов. Okina Olga Il'ichna, Ph.D., leading researcher at the Geological Institute RAS, Moscow. Research interests: isotopy and mass-spectrometry of inorganic matters.
okina@bk.ru
ORCID 0000-0002-1947-4551

Ван Константин Владимирович, к. т. н., старший научный сотрудник Института экспериментальной минералогии им. Д. С. Коржинского РАН, г. Черногловка. Область научных интересов: рентгеноспектральный микроанализ. Van Konstantin Vladimirovich, Ph.D., senior researcher at the Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka. Research interests: electron probe microanalyses.
kvv@iem.ac.ru
ORCID 0000-0002-8053-332x

Конфликт интересов / Conflict of Interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15.02.2024
Принята к публикации 28.03.2024