

ГЕОХИМИЯ ЦИРКОНА ИЗ ПЕГМАТИТОНОСНЫХ ЛЕЙКОГРАНИТОВ  
КОМПЛЕКСА ЛАГМАН, ПРОВИНЦИЯ НУРИСТАН, АФГАНИСТАНЕ. В. Левашова<sup>1</sup> , С. Г. Скублов<sup>\*1,2</sup> , Н. Хамдард<sup>2</sup> , М. А. Иванов<sup>2</sup> , и В. С. Стативко<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия\* **Контакт:** Сергей Геннадьевич Скублов, skublov@yandex.ru

Впервые проведено исследование геохимии циркона (метод SIMS, 2 пробы, 20 точек) из лейкогранитов комплекса Лагман, расположенного в пегматитоносной (LCT-тип) провинции Нуристан (Афганистан). Циркон характеризуется повышенным содержанием Hf (до 34500 мкг/г), имеющим тенденцию увеличиваться к краю зерен. С ростом Hf коррелируется рост содержания Li, Ca, U. Содержание Ti варьирует незначительно и отвечает температуре кристаллизации циркона около 700 °С. Необычным является характер распределения редкоземельных элементов (REE). В большинстве зерен положительная Ce-аномалия отсутствует, что нетипично для магматического циркона. Для ряда зерен краевые зоны отличаются пониженным содержанием REE и «плоским» характером распределения легких REE. Причиной такого распределения REE и отсутствия Ce-аномалии выступает, вероятно, совместная кристаллизация циркона с титанитом, концентрирующим REE и влияющим на фракционирование легких REE. Сравнение изученного циркона с цирконом из других лейкогранитов, в том числе, рассматриваемых как материнские для LCT-пегматитов, показало высокую степень фракционирования расплава лейкогранитов комплекса Лагман, проявленную в высоком содержании ряда редких элементов (Hf, U и других). Поэтому высказанное ранее предположение о генетической связи лейкогранитов комплекса Лагман и крупными пегматитовыми месторождениями лития, широко представленными в провинции Нуристан, на северо-востоке Афганистана, подтверждается новыми данными по геохимии циркона.

**Ключевые слова:** циркон, геохимия редких элементов, геохимия редкоземельных элементов, лейкограниты, комплекс Лагман, Нуристан.

**Цитирование:** Левашова, Е. В., С. Г. Скублов, Н. Хамдард, М. А. Иванов, и В. С. Стативко Геохимия циркона из пегматитоносных лейкогранитов комплекса Лагман, провинция Нуристан, Афганистан // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES2011. — DOI: 10.2205/2024es000916 — EDN: PRIEFZ

### Введение

Глобальная проблема возросших потребностей промышленности в литиевом сырье в настоящее время широко известна. На фоне неминуемого истощения запасов активно разрабатываемых гидроминеральных литиеносных рап озер и рассолов подземных вод, значимость таких рудных объектов, как литиевые (сподуменовые) пегматиты, только возрастает. Афганистан обладает крупными пегматитовыми месторождениями лития, пространственно и генетически связанными с лейкогранитами третьей фазы комплекса Лагман мел-палеогенового возраста [Rossovsky, 1986]. Редкометалльные пегматиты LCT-типа (специализированные на Li, Cs и Ta), к которым относятся сподуменовые пегматиты, широко представлены в северо-восточной части страны, в основном, в провинции Нуристан. Существенный вклад в их открытие и последующее исследование внесли советские геологи в 70-е годы XX века. Однако комплексного минералого-геохимического исследования этих рудных объектов не проводилось, также

<https://elibrary.ru/priefz>

Получено: 3 мая 2024 г.

Принято: 13 июня 2024 г.

Опубликовано: 20 июня 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

практически неизученными остаются и лейкограниты комплекса Лагман, рассматриваемые как материнские для пегматитовых месторождений.

В настоящей статье представлены результаты впервые проведенного исследования геохимии циркона из лейкогранитов комплекса Лагман, пегматитоносная провинция Нуристан, Афганистан. Циркон является минералом-концентратором ряда индикаторных высокочarged элементов (таких как Hf, U, Th), уровень содержания которых позволяет оценить степень фракционной кристаллизации гранитного расплава, как правило, заканчивающейся образованием пегматитов [Yang et al., 2013]. Состав циркона также является одним из самых надежных инструментов для оценки потенциальной рудоносности гранитов.

### Геологическое строение района и характеристика образцов

К комплексу Лагман отнесены образования трех самостоятельных интрузивных фаз, образующих достаточно крупные массивы гранитоидов [Rossovskiy and Chmyrev, 1977]. Первая фаза представлена мелко- и среднезернистыми гранодиоритами, вторая фаза – крупнозернистыми порфириовидными гранитами, третья – среднезернистыми мусковитовыми (реже двуслюдяными), часто с турмалином, гранитами. Обычно массивы приурочены к контактам нуристанской и кашмундской серий и имеют резко вытянутую форму, параллельную вышеуказанным контактам.

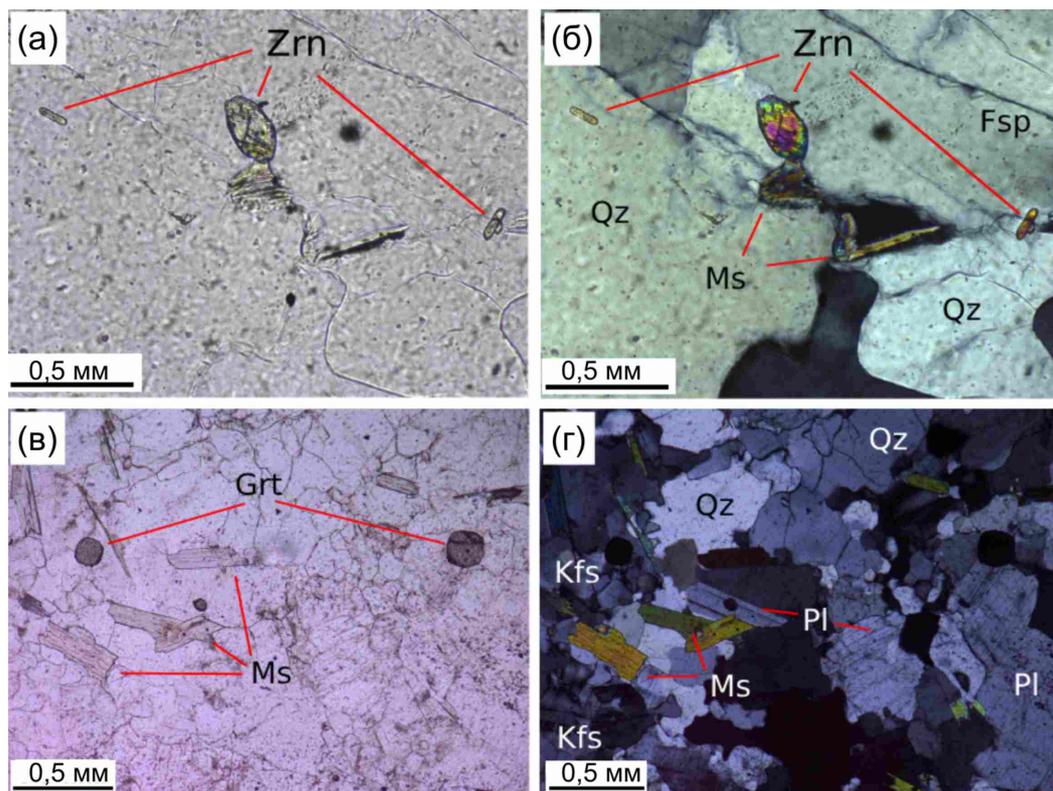
Пробы светло-серых среднезернистых лейкогранитов третьей фазы комплекса Лагман были отобраны Н. Хамдардом в 2023 г. при проведении полевых работ в пегматитоносной провинции Нуристан на месторождении сподуменовых пегматитов Пашки. Проба 18 (35°18'49" с.ш., 70°54'48" в.д.) была отобрана из лейкогранитов (штокообразные тела во вмещающих биотитовых, ставролит-биотитовых и амфиболовых сланцах), расположенных вблизи месторождения; проба 19 (35°13'01" с.ш., 70°52'32" в.д.) – из обнажений, вскрытых при строительстве Нуристанского шоссе и расположенных примерно в 12 км от города Парун, столицы провинции Нуристан. Минеральный состав: калиево-натриевый полевой шпат (30–40%), кварц (25–30%), плагиоклаз (олигоклаз An 25–27, около 30%), мусковит (5–10%). Акцессорными минералами являются апатит, циркон, титанит, изредка гранат (рис. 1). Вторичные изменения выражены в пелитизации и развитии цоизита по плагиоклазам. Визуально и петрографически существенные различия между пробами не наблюдаются.

### Методы исследования

Циркон из проб лейкогранитов 18 и 19 был выделен в минералогической лаборатории ИГГД РАН с помощью электромагнитной сепарации и тяжелых жидкостей. Зерна циркона были помещены в препарат (шайбу) горизонтально по плоскости удлинения и сошлифованы примерно на половину толщины с последующей полировкой. Выбор точек на анализ произведен по оптическим изображениям в отраженном свете.

Предварительно внутреннее строение циркона исследовалось методом SEM-EDS в обратно-отраженных электронах (BSE) на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6510 LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200 (ИГГД РАН). Режим композиционного контраста является весьма информативным при исследовании гетерогенности внутреннего строения минералов [например, Гульбин и др., 2023; Skublov et al., 2023].

Содержание редкоземельных элементов (REE) и редких элементов в цирконе определено на ионном микрозонде Cameca IMS-4f (ЯФ ФТИАН) в трех циклах измерений по стандартной методике [Федотова и др., 2008; Levashova et al., 2024]. Точность определения составляет 10–15 % для элементов с концентрацией >1 мкг/г и 10–20 % для элементов с концентрацией 0,1–1 мкг/г, предел обнаружения составляет 5–10 ppb. Размер кратера составляет примерно 20 мкм. При построении спектров распределения REE состав циркона нормирован к составу хондрита CI [McDonough and Sun, 1995]. Температура кристаллизации циркона рассчитана с помощью термометра Ti-в-цирконе [Watson et al., 2006].



**Рис. 1.** Фотографии шлифов лейкогранитов комплекса Лагман (а, б – проба 18; в, г – проба 19; а, в – без анализатора; б, г – с анализатором). Используются стандартные обозначения минералов.

### Результаты

Циркон из обеих проб представлен удлиненными кристаллами призматической формы с хорошо выраженными гранями дипирамиды на вершинах зерен (рис. 2). Размер зерен по удлинению составляет, как правило, 200–250 мкм (коэффициент удлинения 1:2,5–3). По данным SEM-EDS наблюдается зональность: краевые зоны содержат большее, по сравнению с центром зерен, количество U и Hf. Установлено, что этими элементами обогащены тонкие светлые полосы на краю зерен, формирующие в BSE-изображении осцилляционную зональность. Микровключения в цирконе представлены ксенотимом. Всего было проанализировано по 5 зерен в каждой пробе, по 2 точки в зерно (точка с нечетным номером относится приблизительно к – центру зерна, с последующим четным номером находится в том же зерне, в области вершины дипирамиды, рис. 3).

**Редкоземельные элементы.** В пробе 18 в трех зернах спектры распределения REE имеют схожую конфигурацию в центральной и краевой зонах, характерную для циркона магматического генезиса с дифференцированным характером распределения с ростом от легких к тяжелым REE, при этом в краевой зоне степень фракционирования ( $Lu_N/La_N$  отношение) несколько ниже, по сравнению с центральной. В точках 5 и 6 (рис. 3а) проявлены положительная Ce- и отрицательная Eu-аномалии. В зернах с точками 1–2, 3–4 Ce-аномалия практически отсутствует (рис. 3б), что нетипично для магматического циркона. При этом в точках 1 и 2 спектры распределения в области легких REE имеют нетипичный для циркона наклон с падением нормированного на хондрит содержания от La к Nd (рис. 3б). В зерне с точками 7 и 8 спектры распределения REE различаются – в центральной части зерна присутствует положительная Ce-аномалия ( $Ce/Ce^* = 21,1$ ), в краевой Ce-аномалия отсутствует при близком со-

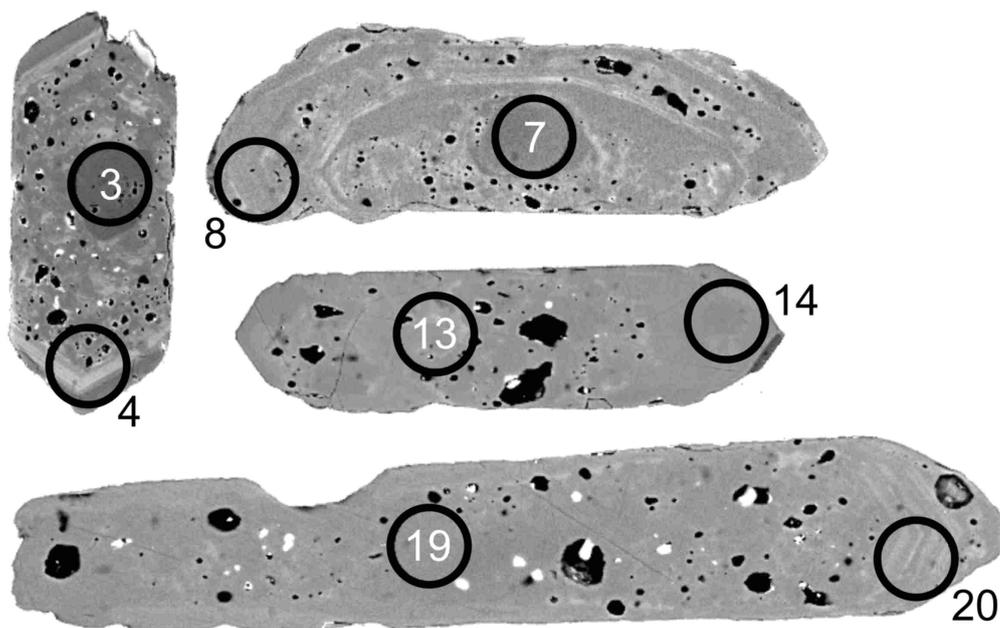


Рис. 2. BSE-изображения циркона из лейкогранитов комплекса Лагман с положением аналитических точек ионного зонда (диаметр кратеров составляет примерно 20 мкм).

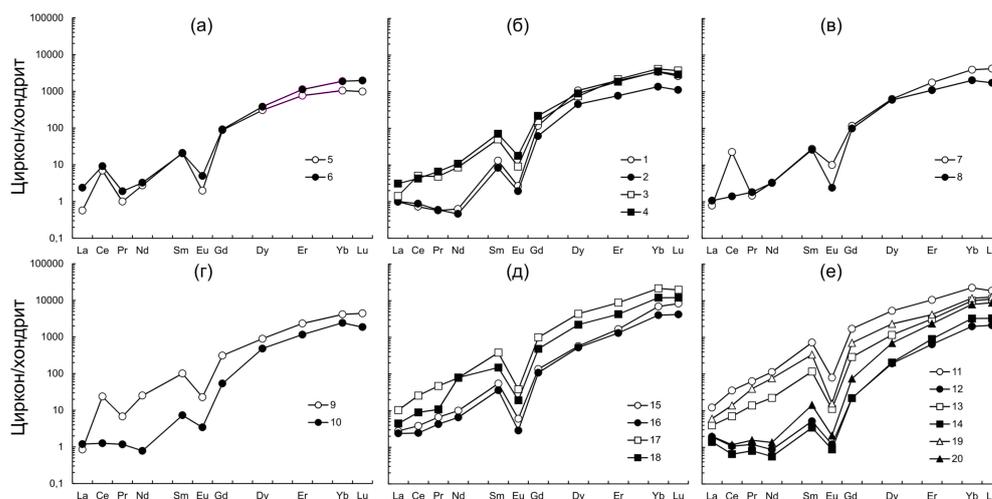


Рис. 3. Спектры распределения REE, нормированные к хондриту CI, для циркона из лейкогранитов комплекса Лагман (а-г – проба 18; д, е – проба 19).

держании других легких REE (рис. 3в). Из наблюдаемых отличий для краевой зоны следует отметить более глубокую отрицательную Eu-аномалию, вызванную пониженным содержанием Eu, и меньший уровень содержания тяжелых REE в ряду Er–Lu (1033 и 550 мкг/г, соответственно). В зерне с точками 9 и 10 распределение REE самое контрастное (рис. 3г). В краевой части содержание REE значительно ниже, чем в центральной (753 и 1470 мкг/г, соответственно). Также изменен характер спектра для краевой части, по сравнению с центральной, – исчезает положительная Ce-аномалия, спектр в области легких REE становится субгоризонтальным.

В пробе 19 Ce-аномалия у циркона отсутствует во всех проанализированных точках. В двух зернах (точки 15–16, 17–18) спектры распределения REE для центральной и краевой зон совпадают или подобны (рис. 3д). В трех зернах (точки 11–12, 13–14, 19–20) краевые зоны циркона отличаются пониженным содержанием всего спектра

REE и выположенным характером распределения в области легких REE (рис. 3е).  $Sm_N/La_N$  отношение при этом уменьшается от 29–59 до 2,5–7,2, соответственно.

**Редкие элементы.** Циркон из пробы 18 отличается варьирующимся содержанием Hf. Минимальное содержание Hf (11 190–15 892 мкг/г) зафиксировано в трех точках – 9, 5 и 6, в которых проявлена положительная Ce-аномалия. Максимальное содержание Hf (в среднем 33 674 мкг/г, точки 1 и 2) установлено для зерна с отсутствием Ce-аномалии и «обратным» наклоном спектров в области легких REE. В двух зернах отмечено значительное (примерно в два раза) увеличение содержания Hf от центральной к краевой зоне (точки 3–4, 9–10).

С ростом Hf коррелируется рост содержания Li. Так, в паре точек 9 и 10 при переходе от центральной к краевой зоне циркона рост содержания Hf от 11 190 до 23 949 мкг/г сопровождается увеличением содержания Li в десять раз (от 1,06 до 10,7 мкг/г).

Кроме того, в цирконе, с резким увеличением содержания Hf к краевой части зерен, растет содержание Ca (примерно в три раза, с 57–79 мкг/г до 158–220 мкг/г) и U (в 4–5 раз, с 1389–2853 мкг/г до 7374–10703 мкг/г).

Содержание Th (составляющее в среднем 96 мкг/г), напротив, имеет тенденцию к снижению в краевых зонах циркона. Особенно это заметно для зерен, где центральная часть имеет положительную Ce-аномалию. Для пары точек 7 и 8 содержание Th уменьшается с 204 до 12,5 мкг/г, для точек 9 и 10 – с 242 до 16,4 мкг/г. Th/U отношение в целом невысокое – для точек с минимальным содержанием Hf и положительной Ce-аномалией (точки 5, 6, 9) оно составляет 0,17–0,33, для остальных – не превышает 0,04. При этом, для краевых зон, обогащенных Hf, Th/U отношение не превышает 0,01. В этих же точках, с положительной Ce-аномалией, зафиксировано наибольшее содержание Ti – 12,7–22,4 мкг/г, которое соответствует температуре кристаллизации циркона около 800 °С. В остальных точках содержание Ti варьирует незначительно и составляет в среднем 5,7 мкг/г, что отвечает около 700 °С.

Содержание Y в цирконе из пробы 18 варьирует от 822 до 3453 мкг/г, положительно коррелируя с уровнем содержания тяжелых REE. Содержание P варьирует от 258 до 980 мкг/г (в среднем 597 мкг/г) и положительно коррелируется как с тяжелыми REE, так и с Y.

Циркон из пробы 19 в целом характеризуется более высоким содержанием Hf – от 17 573 до 29 926 мкг/г, в среднем 24 210 мкг/г. В двух зернах содержание Hf практически неизменно в центральной и краевой зонах, в трех зернах (точки 13–14, 17–18, 19–20) содержание Hf повышается к краю до максимальных значений.

В точках 18 и 20 также повышается (до 15–20 мкг/г) содержание Li, по сравнению с центральной зоной. В целом, содержание Li в цирконе из пробы 19 относительно высокое и составляет в среднем 11,9 мкг/г. Содержание Ca находится на высоком уровне – в среднем 157 мкг/г, в ряде случаев уменьшаясь к краю зерен в 3–5 раз, до 40–60 мкг/г.

Содержание U в цирконе из пробы 19 либо уменьшается к краю зерен (точки 11–12, 13–14, 15–16) в 2–3 раза, вплоть до 2620 мкг/г, либо увеличивается (точки 17–18, 19–20) примерно в 2 раза, максимально достигая 13 865 мкг/г. Средний уровень содержания U в цирконе из пробы 19 сопоставим с пробой 18 (6622 и 5629 мкг/г, соответственно). Понижение к краю зерен содержания Th является общей тенденцией. Для некоторых зерен оно существенное (точки 11 и 12) – 102 и 3,69 мкг/г, для других (точки 19 и 20) менее заметное – 34,6 и 17,5 мкг/г, соответственно. В целом, содержание Th в цирконе из пробы 19 заметно ниже, чем в пробе 18, и составляет в среднем 29 мкг/г. Во всех проанализированных точках величина Th/U отношения крайне низкая – от 0,001 до 0,013.

Содержание Ti в цирконе из пробы 19 варьирует от 2,6 до 9,2 мкг/г (в среднем 4,3 мкг/г), что соответствует температуре кристаллизации циркона около 670 °С.

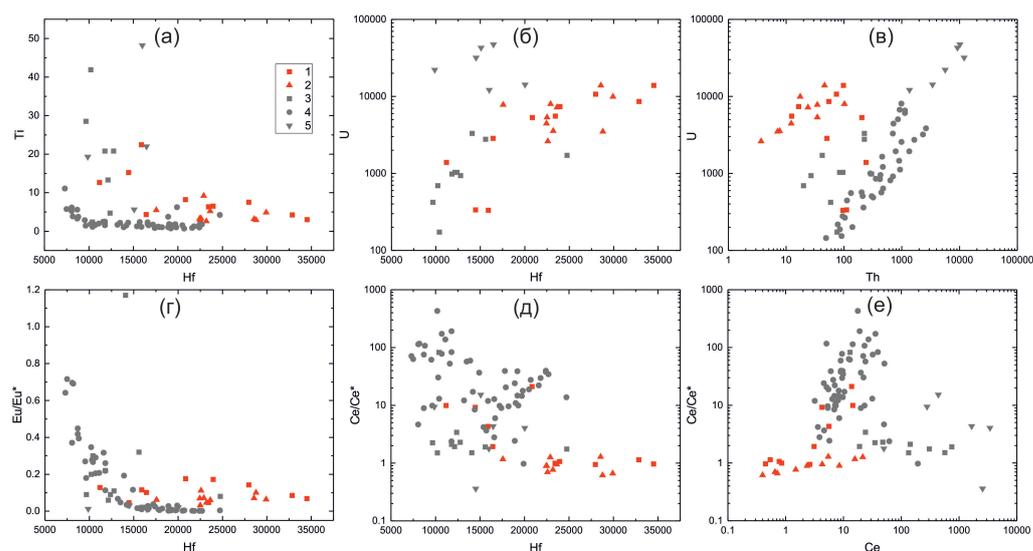
Содержание Y повторяет поведение тяжелых REE в краевых зонах (точки 12, 14, 20), отличающихся пониженным уровнем тяжелых REE, содержание Y падает в 3–4 раза и более, до 649 мкг/г в точке 12. Максимальное содержание Y установлено в центральной точке 11 (14214 мкг/г), в которой содержание тяжелых REE также наибольшее – 7407 мкг/г. Содержание P коррелируется с содержанием Y и тяжелых REE, уровень его содержания выше, чем в цирконе из пробы 18, а диапазон составляет порядок – от 472 до 4304 мкг/г (в среднем 1748 мкг/г).

### Обсуждение результатов

Поскольку циркон является основным минералом-концентратором Hf в земной коре, с одной стороны, кристаллизация циркона контролирует содержание Hf в магматическом расплаве, с другой стороны, содержание Hf в цирконе позволяет судить об уровне содержания этого элемента в расплаве и характере фракционирования расплава. По мере фракционирования гранитного расплава и кристаллизации циркона концентрации как Zr, так и Hf в расплаве будут уменьшаться. Однако при росте циркона преимущественно «расходуется» Zr, а не Hf, что приводит к уменьшению Zr/Hf отношения в сосуществующем с цирконом расплаве. Этот процесс приводит к увеличению содержания Hf в новообразованном цирконе и даже в пределах одного кристалла (в краевых зонах), что отвечает увеличению степени фракционирования гранитного расплава [Claiborne et al., 2010].

В цирконе из типичных, умеренно фракционированных гранитоидов содержание HfO<sub>2</sub> составляет в среднем около 1,43 мас.% [Wang et al., 2010], в то же время в гранитах, образованных из сильно фракционированных расплавов, и в гранитных пегматитах с редкометалльной минерализацией описан циркон, обогащенный гафнием (до 25 мас.%), что приближает его состав к гафнону. Гафнон, (Hf,Zr)SiO<sub>4</sub>, крайне редкий минерал, был обнаружен только в нескольких проявлениях в мире.

С целью оценки степени фракционирования материнского расплава и потенциальной связи с ЛСТ-пегматитами месторождения Пашки редкоэлементный состав циркона из лейкогранитов комплекса Лагман (20 анализов) был сопоставлен (рис. 4) с аналогичными данными для циркона из турмалин-мусковитовых гранитов архейского пегматитового пояса Колмозеро-Воронья, рассматриваемых как материнские



**Рис. 4.** Соотношение содержания редких элементов (мкг/г) для циркона из лейкогранитов комплекса Лагман и гранитов других регионов: 1 и 2 – лейкограниты комплекса Лагман (1 – проба 18; 2 – проба 19); 3 – турмалин-мусковитовые граниты пегматитового пояса Колмозеро-Воронья, Кольский п-ов [Kudryashov et al., 2020]; 4 – лейкограниты батолита Гангдэзе, Тибет [Xia et al., 2021]; 5 – лейкограниты Тургинского массива, Восточное Забайкалье [Hoskin, 2005].

для редкометалльных ЛСТ-пегматитов, расположенных в пределах пояса (10 анализов, [Kudryashov et al., 2020]), циркона из лейкогранитов заключительной фазы батолита Гангдесе, расположенного на юге Лхасского террейна в Тибете (54 анализа, [12]), циркона из редкометалльных лейкогранитов Тургинского массива, Восточное Забайкалье (6 анализов, [Ivanova et al., 2019]).

Как было отмечено выше, индикатором степени фракционирования расплава является содержание Hf в цирконе, поэтому наиболее информативным будет сопоставление данных по содержанию этого элемента с другими несовместимыми элементами. Так, на диаграмме соотношения содержания Hf и Ti (рис. 4а) циркон из лейкогранитов комплекса Лагман отличается, по сравнению с другими объектами, повышенным содержанием Hf (в среднем 23 180 мкг/г) и пониженным – Ti (в основном, не более 10 мкг/г). У циркона из лейкогранитов батолита Гангдесе содержание Hf существенно ниже (в среднем 15 090 мкг/г, не более 24 700 мкг/г), содержание Ti тоже ниже (в среднем 2,4 мкг/г). В цирконе из турмалин-мусковитовых гранитов пояса Колмозеро-Воронья содержание Hf также ниже – (в среднем 13 370 мкг/г), содержание Ti, напротив, выше (в среднем 18,9 мкг/г). В цирконе из редкометалльных гранитов Забайкалья содержание Hf в среднем составляет 15 330 мкг/г, содержание Ti варьирует в широких пределах (от 5 до 48 мкг/г). В целом, для всех объектов, за исключением гранитов Забайкалья, наблюдается отрицательная корреляция содержания в цирконе Hf и Ti, что указывает на закономерное понижение температуры в процессе фракционирования гранитного расплава.

Циркон из лейкогранитов комплекса Лагман, как и циркон из турмалин-мусковитовых гранитов пояса Колмозеро-Воронья, демонстрирует положительную корреляцию содержания Hf и U (рис. 4б). При этом содержание U в цирконе из турмалин-мусковитовых гранитов ниже (в среднем 1300 мкг/г), чем в цирконе из лейкогранитов комплекса Лагман (в среднем 6130 мкг/г). Циркон из гранитов Забайкалья отличается повышенным содержанием U (в среднем 28 370 мкг/г), не коррелирующим с содержанием Hf. Наблюдаемая закономерность для гранитов, связанных с ЛСТ-пегматитами, указывает на общий тренд обогащения циркона ураном при фракционирования расплава.

По соотношению Th и U (рис. 4в) циркон из всех сравниваемых объектов демонстрирует положительную корреляцию между этими элементами. При этом циркон из лейкогранитов комплекса Лагман отличается умеренным содержанием Th (в среднем 62 мкг/г) и занимает обособленную область со значением Th/U отношения около 0,05. Циркон из лейкогранитов батолита Гангдесе и гранитов Забайкалья образует единый тренд с Th/U отношением около 0,25–0,50. Циркон из турмалин-мусковитовых гранитов пояса Колмозеро-Воронья занимает промежуточное положение (Th/U отношение около 0,15).

Величина отрицательной Eu-аномалии для циркона из лейкогранитов комплекса Лагман (Eu/Eu\* составляет в среднем 0,09) в целом сопоставима со значением аномалии для циркона из других объектов (рис. 4г). Сравнимый циркон образует единый тренд с увеличением амплитуды отрицательной Eu-аномалии по мере фракционирования расплава, что также отражается на увеличении содержания Hf.

Величина положительной Ce-аномалии, с одной стороны, является индикаторным признаком циркона магматического происхождения (при этом отношение Ce/Ce\*, как правило, превышает 10 и содержание Ce положительно коррелирует с Ce/Ce\*), с другой стороны, уменьшение отношения Ce/Ce\*, вплоть до исчезновения аномалии, характерно для циркона т.н. гидротермально-метасоматического типа [Hoskin, 2005]. В последнем случае отличительной особенностью циркона является повышенное содержание легких REE, привнесенных флюидами и/или гидротермальными растворами, при этом наблюдается редуцирование положительной Ce-аномалии. Такое изменение состава циркона возможно как при метасоматических процессах, так и на позднемагматических этапах, когда магматический циркон взаимодействует с флюидонасыщенным остаточным расплавом. На диаграмме соотношения содержания Ce и амплитуды Ce-аномалии (отношение Ce/Ce\*, рис. 4д) циркон из лейкогранитов батолита Гангдесе

демонстрирует высокие значения величины аномалии, характерные для магматического циркона, не зависящие от уровня содержания Се. Циркон из редкометалльных гранитов Забайкалья отличается повышенным содержанием Се и низкой величиной  $Se/Se^*$ , что характерно для циркона гидротермально-метасоматического типа. Циркон из пробы 19 лейкогранитов комплекса Лагман и турмалин-мусковитовых гранитов пояса Колмозеро-Воронья образуют единый тренд, указывающий на отсутствие аномалии при любом уровне содержания Се. Если для циркона из гранитов пояса Колмозеро-Воронья такое соотношение возможно объяснить влиянием флюида, привносящего легкие REE, то состав циркона из лейкогранитов комплекса Лагман (проба 19) является нетипичным. Циркон из пробы 18 имеет иной характер соотношения Се и  $Se/Se^*$  – при низком уровне содержания Се аномалия отсутствует (как и в пробе 19), при более высоком содержании Се величина аномалии растет, как и в цирконе из лейкогранитов батолита Гангдесе. Только циркон из лейкогранитов комплекса Лагман демонстрирует отсутствие положительной Се-аномалии при относительно низком содержании Се (в среднем 5 мкг/г).

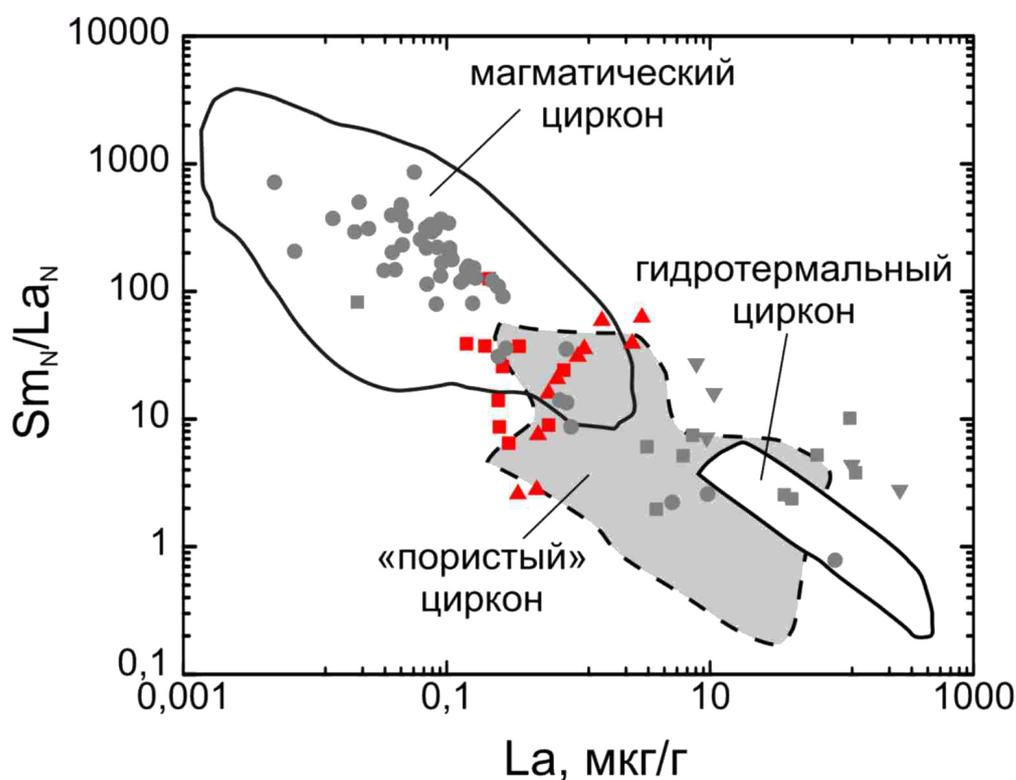
Как предполагалось ранее (обзор в [Loader et al., 2022]), величина положительной Се-аномалии для магматического циркона зависит прежде всего от степени окисления материнского расплава, из которого кристаллизуется циркон – при более окислительных обстановках увеличивается отношение  $Se^{4+}/Se^{3+}$ , что облегчает вхождение  $Se^{4+}$  с меньшим ионным радиусом, по сравнению с  $Se^{3+}$ , в структуру циркона. Однако недавние исследования показали, что на величину Се-аномалии в цирконе может оказывать влияние совместная кристаллизация с титанитом (в меньшей степени, с амфиболом и апатитом), при этом степень окисления магматического расплава может и не изменяться [Loader et al., 2022]. Титанит, установленный петрографическим способом в обеих пробах лейкогранитов комплекса Лагман, является минералом-концентратором не только легких REE, но также содержит существенное количество тяжелых REE. Это согласуется с тем, что краевые зоны циркона из лейкогранитов комплекса Лагман обеднены не только легкими REE, но всем спектром REE (рис. 4г, е). Поэтому причину отсутствия Се-аномалии в цирконе следует связывать с совместной кристаллизацией с титанитом, а не с воздействием флюидов на позднемагматической стадии, при котором аномалия тоже исчезает, но резко увеличивается уровень содержания легких REE при выполаживании их спектра. Апатит, который также был отмечен в лейкогранитах комплекса Лагман, если и влиял на фракционирование Се, то менее значительно, чем титанит, поскольку в ряде зерен содержание фосфора не меняется к краю, а в некоторых случаях даже увеличивается (точки 9 и 10).

Дополнительным аргументом в пользу того, что при эволюции гранитного расплава вряд ли происходила смена условий кристаллизации на более восстановительные (в результате чего тоже может уменьшаться положительная Се-аномалия в цирконе) выступает тот факт, что в краевой зоне циркона амплитуда отрицательной Eu-аномалии, по сравнению с центральной частью, либо не изменяется, либо уменьшается, что, напротив, говорит о постоянной или возрастающей фугитивности кислорода, необходимой для окисления  $Eu^{2+}$  до  $Eu^{3+}$ .

Наиболее часто используемой для оценки генетического типа циркона (магматический или гидротермально-метасоматический), а также оценки эволюции его состава, является дискриминационная диаграмма по соотношению содержания La и  $Sm_N/La_N$  отношения (соотношение уровня легких REE на примере La и степени их фракционирования), предложенная [Hoskin, 2005] и позднее дополненная полем «пористого» циркона (испытывшего флюидное воздействие, но различного по генезису). На поздних стадиях фракционирования гранитного расплава фигуративные точки циркона могут образовывать тренд, направленный из магматического поля в гидротермальное [Скублов и др., 2024].

На данной диаграмме циркон из лейкогранитов батолита Гангдесе, имеющий минимальное содержание La и максимальную степень дифференциации легких REE, преимущественно попадает в верхнюю часть поля магматического циркона (рис. 5).

Циркон из турмалин-мусковитовых гранитов пояса Колмозеро-Воронья и редкометалльных гранитов Забайкалья находится в области «пористого» и гидротермального циркона благодаря высокому уровню содержания REE и пологому характеру их спектров. Циркон из лейкогранитов комплекса Лагман находится в нижней части поля магматического циркона и даже выходит за его границы. Примечательно, что точки для каждой пробы лейкогранитов образуют индивидуальные тренды, направленность которых не согласуется с общей тенденцией изменения состава циркона в процессе фракционирования расплава (по диагонали графика из магматического поля в гидротермальное). Особенно отличается циркон из пробы 19 – уменьшение содержания La приводит к выполаживанию спектра легких REE. Такая закономерность является крайне нетипичной для магматического циркона, что подтверждает практически «перпендикулярное» к циркону из комплекса Лагман положение тренда уменьшения степени фракционирования легких REE с ростом их содержания для циркона из лейкогранитов батолита Гангдесе.



**Рис. 5.** Дискриминационная диаграмма а –  $Sm_N/La_N$  для определения генезиса циркона. Поля составов приведены по [Hoskin, 2005] с дополнениями. Условные обозначения соответствуют рис. 4.

#### Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что циркон из лейкогранитов комплекса Лагман, расположенного в пегматитоносной провинции Нуристан (Афганистан), характеризуется повышенным содержанием Hf (до 34500 мкг/г), имеющим тенденцию увеличиваться к краю зерен. С ростом Hf коррелируется рост содержания Li. Кроме того, в цирконе с увеличением содержания Hf к краевой зоне растет содержание Ca (примерно в 3 раза) и U (в 4–5 раз, до 13850 мкг/г). Содержание Th, напротив, имеет тенденцию к снижению в краевых зонах. Th/U отношение в целом низкое (в среднем 0,05). Содержание Ti варьирует незначительно и отвечает температуре кристаллизации циркона около 700 °С. Содержание P коррелирует с содержанием Y и тяжелых REE,

диапазон его содержания укладывается в интервал от 250 до 4300 мкг/г. Необычным является характер распределения REE (рис. 2). В большинстве зерен из пробы 18 положительная Ce-аномалия отсутствует, что нетипично для магматического циркона. Также изменен характер спектра для краевой части, по сравнению с центральной, – исчезает положительная Ce-аномалия, спектр в области легких REE становится субгоризонтальным. В пробе 19 Ce-аномалия отсутствует во всех проанализированных точках циркона. В четырех зернах краевые зоны отличаются пониженным содержанием всего спектра REE (легкие REE – более чем на порядок, тяжелые REE – в разы) и «плоским» характером распределения в области легких REE.  $Sm_N/La_N$  отношение при этом уменьшается от 30–60 до 3–7. Причиной такого распределения REE и отсутствия Ce-аномалии выступает, вероятно, совместная кристаллизация циркона с титанитом, концентрирующим REE и влияющим на фракционирование легких REE. Фактор изменения степени окисления гранитного расплава оценить сложно, возможно, он не проявился.

Сравнение редкоэлементного состава циркона из лейкогранитов комплекса Лагман с цирконом из других лейкогранитов, в том числе, считающихся материнскими для продуктивных ЛСТ-пегматитов, показало высокую степень фракционирования лейкогранитов комплекса Лагман, проявленную в высоком содержании ряда редких элементов (Hf, U и других). Поэтому высказанное ранее предположение о генетической связи лейкогранитов комплекса Лагман и крупными пегматитовыми месторождениями лития, широко представленными в провинции Нуристан, в северо-восточной части Афганистана, подтверждается новыми данными по геохимии циркона.

**Благодарности.** Авторы благодарят О. Л. Галанкину (ИГГД РАН), С. Г. Симакина и Е. В. Потапова (ЯФ ФТИАН) за помощь в аналитических исследованиях циркона. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГГД РАН (FMUW-2022-0005).

## Список литературы

- Гульбин Ю. Л., Акбарпуран Хайяти С. А., Сироткин А. Н. Минеральный состав и термобарометрия метаморфических пород Западного Нью-Фрисланда, Шпицберген // Записки Горного института. — 2023. — Т. 263. — С. 657–673. — EDN: XGNKDDQ.
- Скублов С. Г., Левашова Е. В., Мамыкина М. Е. и др. Полифазный Белокурухинский массив гранитов, Горный Алтай: изотопно-геохимическое исследование циркона // Записки Горного института. — 2024. — EDN: RGKCIJ.
- Федотова А. А., Бибилова Е. В., Симакин С. Г. Геохимия циркона (данные ионного микрозонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях // Геохимия. — 2008. — Т. 46, № 9. — С. 912–927. — EDN: JRFNRX.
- Claiborne L. L., Miller C. F., Wooden J. L. Trace element composition of igneous zircon: a thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain, Nevada // Contributions to Mineralogy and Petrology. — 2010. — Vol. 160, no. 4. — P. 511–531. — DOI: [10.1007/s00410-010-0491-5](https://doi.org/10.1007/s00410-010-0491-5).
- 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. — Vol. 69, no. 3. — P. 637–648. — DOI: [10.1016/j.gca.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006).
- Ivanova A. A., Sviritsko L. F., Badanina E. V., et al. Zircon from the Turga Multiphase Massif with Amazonite Granites (Eastern Transbaikalia) and Its Petrogenetic Significance // Geology of Ore Deposits. — 2019. — Vol. 61, no. 8. — P. 707–721. — DOI: [10.1134/S1075701519080051](https://doi.org/10.1134/S1075701519080051).
- Kudryashov N. M., Udoratina O. V., Coble M. A., et al. Geochronological and Geochemical Study of Zircon from Tourmaline-Muscovite Granites of the Archaean Kolmozero-Voronya Greenstone Belt: Insights into Sources of the Rare-Metal Pegmatites // Minerals. — 2020. — Vol. 10, no. 9. — P. 760. — DOI: [10.3390/min10090760](https://doi.org/10.3390/min10090760).
- Levashova E., Skublov S., Hamdard N., et al. Trace element composition (ppm) of zircon from leucogranites of the Laghman complex. — Moscow : ESDB repository, GCRAS, 2024. — DOI: [10.2205/2024es000916-data](https://doi.org/10.2205/2024es000916-data).
- Loader M. A., Nathwani C. L., Wilkinson J. J., et al. Controls on the magnitude of Ce anomalies in zircon // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 2022. — Vol. 328. — P. 242–257. — DOI: [10.1016/j.gca.2022.03.024](https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.03.024).

- McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chemical Geology*. — 1995. — Vol. 120, no. 3/4. — P. 223–253. — DOI: [10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- Rossovskiy L. N., Chmyrev V. M. Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan) // *International Geology Review*. — 1977. — Vol. 19, no. 5. — P. 511–520. — DOI: [10.1080/00206817709471047](https://doi.org/10.1080/00206817709471047).
- Rossovsky L. N. Rare metallic pegmatite belts of the Hindukush, Eastern Afghanistan // *Geotectonic evolution and metallogeny of the Mediterranean area and Western Asia*. — Vienna : Springer, 1986. — P. 53–58.
- Skublov S. G., Petrov D. A., Galankina O. L., *et al.* Th-Rich Zircon from a Pegmatite Vein Hosted in the Wiborg Rapakivi Granite Massif // *Geosciences*. — 2023. — Vol. 13, no. 12. — P. 362. — DOI: [10.3390/geosciences13120362](https://doi.org/10.3390/geosciences13120362).
- Wang X., Griffin W. L., Chen J. Hf contents and Zr/Hf ratios in granitic zircons // *Geochemical Journal*. — 2010. — Vol. 44, no. 1. — P. 65–72. — DOI: [10.2343/geochemj.1.0043](https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0043).
- Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. — 2006. — Vol. 151, no. 4. — P. 413–433. — DOI: [10.1007/s00410-006-0068-5](https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5).
- Xia X.-P., Meng J., Ma L., *et al.* Tracing magma water evolution by H<sub>2</sub>O-in-zircon: A case study in the Gangdese batholith in Tibet // *Lithos*. — 2021. — Vol. 404/405. — P. 106445. — DOI: [10.1016/j.lithos.2021.106445](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106445).
- Yang W.-B., Niu H.-C., Shan Q., *et al.* Geochemistry of magmatic and hydrothermal zircon from the highly evolved Baerzhe alkaline granite: implications for Zr-REE-Nb mineralization // *Mineralium Deposita*. — 2013. — Vol. 49, no. 4. — P. 451–470. — DOI: [10.1007/s00126-013-0504-1](https://doi.org/10.1007/s00126-013-0504-1).

# GEOCHEMISTRY OF ZIRCON FROM PEGMATITE-BEARING LEUCOGRANITES OF THE LAGHMAN COMPLEX, NURISTAN PROVINCE, AFGHANISTAN

E. V. Levashova<sup>1</sup>, S. G. Skublov<sup>\*,1,2</sup>, N. Hamdard<sup>2</sup>, M. A. Ivanov<sup>2</sup>, and V. S. Stativko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

\*\*Correspondence to: Sergey Skublov, skublov@yandex.ru

For the first time, a study was carried out on the geochemistry of zircon (SIMS method, 2 samples, 20 points) from leucogranites of the Laghman complex, located in the pegmatite-bearing (LCT-type) province of Nuristan (Afghanistan). Zircon is characterized by a high Hf content (up to 34 500 ppm), which tends to increase towards the edges of the grains. An increase in the content of Li, Ca, and U is correlated with an increase in Hf. The content of Ti varies slightly and corresponds to the crystallization temperature of zircon about 700 °C. The pattern of REE distribution is unusual. In most grains there is no positive Ce-anomaly, which is not typical for igneous zircon. For a number of grains, the marginal zones are distinguished by a reduced content of REE and a flat distribution pattern of light REE. The reason for this distribution of REE and the absence of Ce-anomaly is probably the joint crystallization of zircon with titanite, which concentrates REE and affects the fractionation of light REE. A comparison of the studied zircon with zircon from other leucogranites, including those considered as parental for LCT pegmatites, showed a high degree of fractionation of the melt of leucogranites of the Laghman complex, manifested in a high content of a number of trace elements (Hf, U and others). Therefore, the previously stated assumption about the genetic connection of leucogranites of the Laghman complex and large pegmatite lithium deposits, widely represented in the Nuristan province, in northeastern Afghanistan, is confirmed by new data on zircon geochemistry.

**Keywords:** zircon, geochemistry of trace elements, geochemistry of rare earth elements, leucogranites, Laghman complex, Nuristan.

**Citation:** Levashova, E. V., S. G. Skublov, N. Hamdard, M. A. Ivanov, and V. S. Stativko (2024), Geochemistry of Zircon from Pegmatite-bearing Leucogranites of the Laghman Complex, Nuristan Province, Afghanistan, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES2011, <https://doi.org/10.2205/2024ES000916> EDN: Priefz

Received: 3 May 2024

Accepted: 13 June 2024

Published: 20 June 2024



© 2024. The Authors.

## References

- Claiborne L. L., Miller C. F., Wooden J. L. Trace element composition of igneous zircon: a thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain, Nevada // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. — 2010. — Vol. 160, no. 4. — P. 511–531. — DOI: [10.1007/s00410-010-0491-5](https://doi.org/10.1007/s00410-010-0491-5).
- Fedotova A. A., Bibikova E. V., Simakin S. G. Ion-microprobe zircon geochemistry as an indicator of mineral genesis during geochronological studies // *Geochemistry International*. — 2008. — Vol. 46, no. 9. — P. 912–927. — DOI: [10.1134/S001670290809005X](https://doi.org/10.1134/S001670290809005X). — EDN: JRFNRX.
- Gulbin, Yu. L., Akbarpuran Khaiyati S. A., Sirotkin A. N. Mineral composition and thermobarometry of metamorphic rocks of western Ny Friesland, Svalbard // *Journal of Mining Institute*. — 2023. — Vol. 263. — P. 657–673. — EDN: XGNKDQ.

- 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. — Vol. 69, no. 3. — P. 637–648. — DOI: [10.1016/j.gca.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006).
- Ivanova A. A., Syritso L. F., Badanina E. V., *et al.* Zircon from the Turga Multiphase Massif with Amazonite Granites (Eastern Transbaikalia) and Its Petrogenetic Significance // *Geology of Ore Deposits*. — 2019. — Vol. 61, no. 8. — P. 707–721. — DOI: [10.1134/S1075701519080051](https://doi.org/10.1134/S1075701519080051).
- Kudryashov N. M., Udoratina O. V., Coble M. A., *et al.* Geochronological and Geochemical Study of Zircon from Tourmaline-Muscovite Granites of the Archaean Kolmozero-Voronya Greenstone Belt: Insights into Sources of the Rare-Metal Pegmatites // *Minerals*. — 2020. — Vol. 10, no. 9. — P. 760. — DOI: [10.3390/min10090760](https://doi.org/10.3390/min10090760).
- Levashova E., Skublov S., Hamdard N., *et al.* Trace element composition (ppm) of zircon from leucogranites of the Laghman complex. — ESDB repository, GCRAS, 2024. — DOI: [10.2205/2024es000916-data](https://doi.org/10.2205/2024es000916-data).
- Loader M. A., Nathwani C. L., Wilkinson J. J., *et al.* Controls on the magnitude of Ce anomalies in zircon // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2022. — Vol. 328. — P. 242–257. — DOI: [10.1016/j.gca.2022.03.024](https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.03.024).
- McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chemical Geology*. — 1995. — Vol. 120, no. 3/4. — P. 223–253. — DOI: [10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- Rossovskiy L. N., Chmyrev V. M. Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan) // *International Geology Review*. — 1977. — Vol. 19, no. 5. — P. 511–520. — DOI: [10.1080/00206817709471047](https://doi.org/10.1080/00206817709471047).
- Rossovsky L. N. Rare metallic pegmatite belts of the Hindukush, Eastern Afghanistan // *Geotectonic evolution and metallogeny of the Mediterranean area and Western Asia*. — Vienna : Springer, 1986. — P. 53–58.
- Skublov S. G., Levashova E. V., Mamykina M. E., *et al.* The polyphase Belokurikhinsky granite massif, Gorny Altai: isotope-geochemical study of zircon // *Journal of Mining Institute*. — 2024. — EDN: RGKCIJ.
- Skublov S. G., Petrov D. A., Galankina O. L., *et al.* Th-Rich Zircon from a Pegmatite Vein Hosted in the Wiborg Rapakivi Granite Massif // *Geosciences*. — 2023. — Vol. 13, no. 12. — P. 362. — DOI: [10.3390/geosciences13120362](https://doi.org/10.3390/geosciences13120362).
- Wang X., Griffin W. L., Chen J. Hf contents and Zr/Hf ratios in granitic zircons // *Geochemical Journal*. — 2010. — Vol. 44, no. 1. — P. 65–72. — DOI: [10.2343/geochemj.1.0043](https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0043).
- Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. — 2006. — Vol. 151, no. 4. — P. 413–433. — DOI: [10.1007/s00410-006-0068-5](https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5).
- Xia X.-P., Meng J., Ma L., *et al.* Tracing magma water evolution by H<sub>2</sub>O-in-zircon: A case study in the Gangdese batholith in Tibet // *Lithos*. — 2021. — Vol. 404/405. — P. 106445. — DOI: [10.1016/j.lithos.2021.106445](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106445).
- Yang W.-B., Niu H.-C., Shan Q., *et al.* Geochemistry of magmatic and hydrothermal zircon from the highly evolved Baerzhe alkaline granite: implications for Zr-REE-Nb mineralization // *Mineralium Deposita*. — 2013. — Vol. 49, no. 4. — P. 451–470. — DOI: [10.1007/s00126-013-0504-1](https://doi.org/10.1007/s00126-013-0504-1).