

УДК 550.93 (234.852)
DOI 10.19110/1994-5655-2020-1-96-105

О.В. УДОРАТИНА*,, А.С. ШУЙСКИЙ*,
В.А. КАПИТАНОВА***

**ГРАНИТОИДЫ КОЖИМСКОГО МАССИВА
(ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ):
U-Pb, Lu-Hf ДАННЫЕ**

**Институт геологии им. акад. Н.П. Юшкина
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г. Сыктывкар*

***Томский государственный университет,
г. Томск*

udoratina@geo.komisc.ru

O.V. UDORATINA*,, A.S. SHUISKY*,
V.A. KAPITANOVA***

**GRANITOIDS OF THE KOZHIM MASSIF
(SUBPOLAR URALS):
U-Pb, Lu-Hf DATA**

**N.P. Yushkin Institute of Geology,
Federal Research Centre Komi Science Centre,
Ural Branch, RAS,
Syktывkar*

***Tomsk State University,
Tomsk*

Аннотация

Установлен возраст (U-Pb, SIMS), особенности распределения PЗЭ, Ti, Hf, Y, а также Lu-Hf изотопно-геохимические характеристики в цирконах лейкогранитов Кожимского массива (Приполярный Урал). Выделены две возрастные группы цирконов: 619 и 485 млн лет. Породы массива по своим петро-геохимическим характеристикам отнесены к А-гранитам. Полученные новые петро-геохимические, изотопно-геохимические и геохронологические данные указывают на возможность кристаллизации пород на рубеже кембрия-ордовика. Цирконы с более древними возрастными наследованы от более ранних этапов.

Ключевые слова:

А-граниты, цирконы, U-Pb (SIMS), изотопно-геохимические характеристики, Приполярный Урал

Abstract

The age (U-Pb, SIMS), distribution features of REE, Ti, Hf, Y in zircons of leucogranites of the Kozhim massif (Subpolar Urals) were established, isotope-geochemical data (Lu-Hf), allowing to establish the isotope-geochemical characteristics of rock protoliths were obtained. Two age groups of zircons that differ in age, geochemical (REE distribution), thermal (t crystallization), isotopic (Lu-Hf) characteristics, and calculated model ages of protoliths are distinguished. Zircons with an age of 619 Ma crystallized at a temperature of 808–717°C, have crust-mantle values of the hafnium isotopic composition (+ 0.87– + 1.41), the model age of the protolith TDM2 is 1.33–1.31 Ga. Zircons with an age of 485 Ma were formed at a temperature of 868–742°C, have more mantle characteristics of the hafnium isotopic composition (+ 2.50– + 3.42) and the model age of the protolith TDM2 1.15–1.07 Ga. New petro-geochemical, isotope-geochemical and geochronological data indicate crystallization of rocks at the Cambrian-Ordovician boundary. New petro-geochemical, isotope-geochemical and geochronological data indicate the possibility of crystallization of rocks at the Cambrian-Ordovician boundary. The obtained time in the evolution of this part of the Subpolar Urals correlates with riftogenic geodynamic conditions (520–480 Ma), under which granites with the characteristics of A granite type were melted. Zircons with older ages are inherited from earlier stages.

Keywords:

A-granites, zircons, U-Pb (SIMS), isotope-geochemical characteristics, Subpolar Urals

Введение

Гранитоиды Кожимского массива выведены на поверхность в верховьях р. Кожим на Приполярном Урале (рис. 1, а). Структурно массив расположен в северной части Ляпинского антиклинория (Хобеизская антиклиналь, Няртинский блок), вме-

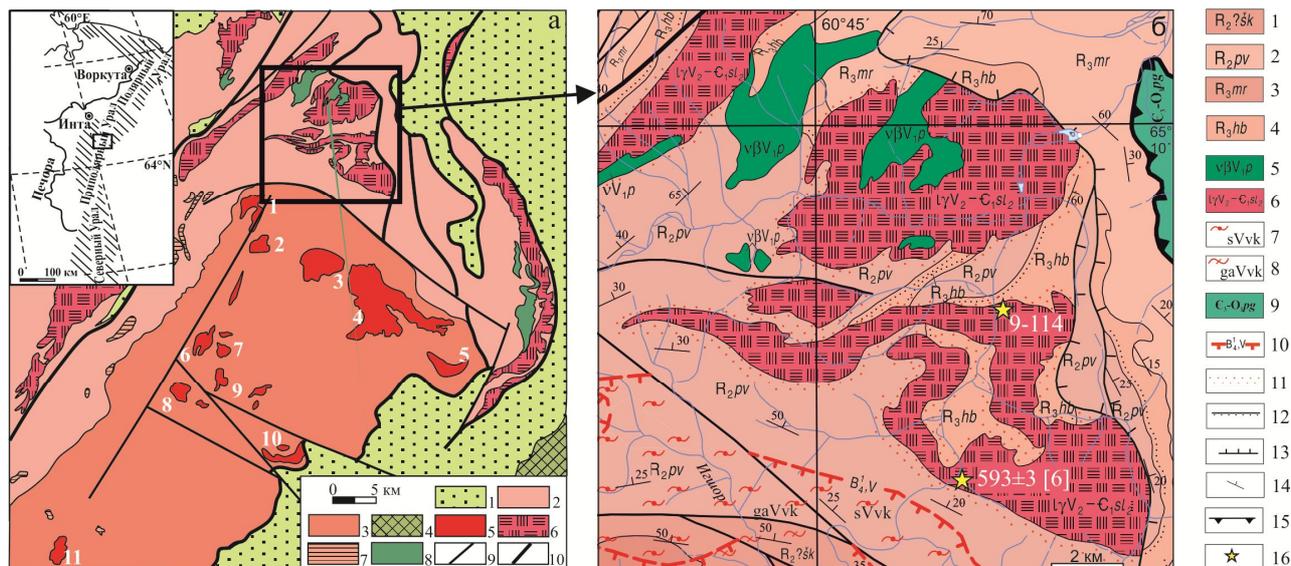


Рис. 1. а) Схема размещения гранитоидных массивов ядра Хобеизской антиклинали. 1 – образования Западно-Уральской мегазоны; 2–3 – образования Центрально-Уральской мегазоны: 2 – среднего рифея-венда, 3 – нижнего-среднего рифея (ядро Хобеизской антиклинали); 4 – комплексы Тагильской мегазоны; 5 – гранитоидные 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 – Мансаранизский, 7 – Западновободненский, 8 – Лавкашорский, 9 – Свободненский, 10 – Балашовский, 11 – Устьняртинский.

б) Геологическая карта Кожимского массива (фрагмент [1]). 1 – Щокурьинская свита; 2 – Пуйвинская свита; 3 – Мороинская свита; 4 – Хобеинская свита; 5 – Парнукский комплекс диорит-габбровый гипабиссальный; 6 – Сальнерско-маньхамбовский комплекс, вторая фаза; 7 – метабазит-сланцевый подкомплекс; 8 – гнейсо-амфиболит-кристаллосланцевый подкомплекс; 9 – Погурейская свита; 10 – граница метаморфических фаций и субфаций. Эпидот амфиболитовая фация; 11 – контактовые роговики; 12 – несогласное залегание; 13 – надвиг; 14 – элементы залегания слоистости (наклонно); 15 – шарьяж; 16 – образец.

Fig. 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-Vendian, 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 – Salner-Manhambov, 7 – Panechaiz, 8 – Parnuk; 9 – faults; 10 – thrusts. Numbers in the diagram indicate massifs: 1 – Nikolayshor, 2 – Basis, 3 – Ambarshor, 4 – Khamleryu, 5 – Palnikshor, 6 – Mansaraniz, 7 – Zapadnosvobodnensk, 8 – Lavkashor, 9 – Svobodnensk, 10 – Balashov, 11 – Ustnyartin. б) Geological map of the Kozhim massif (fragment [1]). 1 – Shchokuryin suite; 2 – Puyvin suite; 3 – Moroin suite; 4 – Khibein suite; 5 – Parnuk complex of diorite-gabbro hypabyssal; 6 – Salner-Manhambov complex phase 2; 7 – metabasite-mica-shale subcomplex; 8 – gneiss-amphibolite-crystal-shale subcomplex; 9 – Pogurey suite; 10 – boundary of metamorphic facies and subfacies. Epidote amphibolite facies; 11 – contact hornfels; 12 – dissonant bedding; 13 – thrust; 14 – elements of bedding (inclined); 15 – thrust nappe; 16 – sample.

щающими породами являются отложения пуйвинской, мороинской и хобеинской свит [1, 2].

Породы массива долгое время рассматривались как петротип молодого (верхнепалеозойского) кожимского гранитоидного комплекса [3]. Впоследствии возрастное положение пород этого комплекса неоднократно пересматривалось в связи с появлением новых геохронологических и геологических данных [4–7]. В последние годы в результате интенсивных исследований образований Няртинского блока, в том числе и гранитоидов в его обрамлении и появлением современных изотопно-геохимических данных, возраст пород принимается как среднерифейский [7] или вендский [5] или поздневендско-раннекембрийский [1].

На картах последнего поколения породы массива отнесены к группе массивов лейкогранитов второй фазы сальнерско-маньхамбовского комплекса северного обрамления няртинского комплекса [1].

Начиная с середины прошлого века, благодаря многолетним тематическим исследованиям М.В. Фишмана, Б.А. Голдина, Е.П. Калинина [3, 7, 8], Л.В. Махлаева [9], А. М. Пыстина, Ю.И. Пыстиной [4–6], В.Л. Андреичева [10, 11], Ю.И. Денисовой [12], работе больших геолого-съёмочных коллективов [1, 2, 13], происходило накопление геологических, петрографических, петрохимических, геохимических и изотопно-геохронометрических данных по породам Кожимского массива. Получение новых изотопно-

геохронологических данных по гранитам массива позволяет более точно определить изотопно-геохимические особенности плавящихся протолитов, определить температуры кристаллизации и возраст процессов гранитообразования.

Методы исследований

Исследования проведены в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар): петрографические, химические (классический метод), количественный спектральный метод (Ga, F, Be, Y, Pb). Определения редких, рассеянных и редкоземельных элементов выполнены в ГЕОХИ РАН (г. Москва) методом нейтронной активации. Возраст цирконов исследован U-Pb (SIMS) методом на приборе SHRIMP RG в Стэнфордском университете, США, методика приведена в работе [14]. Изотопный состав гафния изучен в Институте геологии и минеральных ресурсов (г. Тяньцзинь, Китай) по методике, приведенной в работе [15].

Породы массива обнажены на территории притоков р. Кожим рек Кузь-Пуаю и Понью. Известно два маломощных тела пластообразной, неправильной формы, одно более изометричное (северное), другое (южное) с извилистыми контурами (рис. 1, б), суммарная площадь выхода гранитоидов на поверхность составляет около 70 км² [1]. А.М.Пыстинным северное тело рассматривается как отдельный Кузьпуаюский массив [6].

Массив сложен светлыми (бело-розовыми, бело-серыми с зеленоватым оттенком), мелко- и среднезернистыми биотитовыми и двуслюдяными (биотит-мусковитовыми) лейкогранитами. Редко отмечаются разности с порфирированной (КПШ) структурой. Минеральный состав лейкогранитов (об., %): кварц – 35–45, калиевый полевой шпат – 40–60, био-

тит до 5, мусковит до 5–7. Акцессорные минералы: циркон, апатит, титанит, алланит, торит. Рудные минералы: магнетит, сульфиды (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, молибденит). Вторичные минералы: серицит, мусковит, хлорит, кальцит, эпидот, клиноцоизит. Породы массива представлены преимущественно умеренно-щелочными лейкогранитами, в несколько меньшей степени – лейкогранитами. Незначительно отмечаются умеренно-щелочные граниты и граниты. Средний состав массива (SiO₂ – 75,52%; Na₂O+K₂O – 7,83%) соответствует лейкограниту, принадлежит калиево-натриевой серии (Na₂O/K₂O – 0,80), отвечает весьма высокоглинозёмистым породам (al' – 5,0) [1].

Породы массива нами опробованы в северной части южного тела в правом борту р. Кожим напротив впадения руч. Епко-Шор (рис. 1, б), здесь (65°07'27"; 60°52'06") в элювиальном развале породы светло-зеленовато-белого цвета, массивные (слабополосчатые), среднезернистые. Минералогический состав (об., %): калиевый полевой шпат – 30–40, кварц – 25–40, плагиоклаз (альбит) – 10–15, биотит-мусковит до 5. Акцессорные минералы: циркон, апатит, титанит, вторичные – серицит; рудные – магнетит.

Согласно Петрографическому кодексу, породы относятся к кислым плутоническим нормально-щелочным породам – лейкогранитам (табл. 1, рис. 2, а, б). Содержание мас., % составляет: кремнезема 73, глинозема 14.4, оксида натрия 3, оксида калия 4.7. Характеризуются небольшим преобладанием K₂O над Na₂O (Na₂O/K₂O–0.64). Порода с индексом апаитности (0.7), индексом глиноземистости ASI (1.33) и величиной коэффициента глинозёмистости al' – 6.5 – весьма глинозёмистая, положение точки состава этой породы на диаграмме Al/(Na+K)–Al/(Ca+Na+K) указывает на весомый вклад коро-

Таблица 1

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

Table 1

Chemical composition (wt. %), the content of impurity elements (ppm) and indicator ratios in the rock

| Химический состав /Chemical composition | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------|
| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | ППП |
| 9-114 | 73.91 | 0.10 | 14.35 | 1.19 | 0.80 | 0.04 | 0.21 | 0.43 | 3.00 | 4.71 | 0.02 | 1.08 |
| Индикаторные отношения / Characteristic ratios | | | | | | | | | | | | |
| | ASI | Ga/Al | K/Rb | а.и. | Кф | al' | Fe* | Na ₂ O+K ₂ O | Na ₂ O/K ₂ O | (La/Yb) _n | Eu/Eu* | ΣРЗЭ |
| 9-114 | 1.33 | 3.29 | 236 | 0.70 | 0.9 | 6.5 | 0.78 | 7.71 | 0.64 | 3.3 | 0.94 | 99.95 |
| Элементы /Elements | | | | | | | | | | | | |
| 9-114 | Sr | Rb | Ba | Ta | Hf | Zr | Be* | Ga* | Y* | F* | Pb* | La |
| | 80 | 165 | 570 | 1.6 | 4.25 | 150 | 4.5 | 25 | 30 | 110 | 10 | 17.0 |
| | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb |
| | 35.0 | 4.1 | 17.0 | 4.4 | 1.49 | 5.4 | 0.85 | 5.2 | 1.22 | 3.6 | 0.57 | 3.5 |
| | Lu | Cs | Sc | Cr | Co | Ni | As | Sb | Th | U | Br | Au |
| 0.61 | 3.3 | 7.8 | 5.6 | 0.33 | 39 | 57.6 | 0.23 | 17.8 | 16.1 | 0.27 | 0.011 | |

Примечание: Определения проведены методом классической химии. * – элементы определены количественным спектральным методом, остальные методом нейтронной активации. Fe* – железистость (FeO_{tot}/(FeO_{tot}+MgO)); а.и. – апаитовый индекс (Na+K/Al); ASI – [Al/Ca–1.67P+Na+K]; Кф=(FeO+Fe₂O₃)/(MgO+FeO+Fe₂O₃); al' = Al₂O₃/(Fe₂O₃+FeO+MgO).

Note: “—” not determined. Fe* – iron index (FeO_{tot}/(FeO_{tot}+MgO)); а.и. – apait index (Na+K/Al); ASI – [Al/Ca–1.67P +Na +K]; Кф=(FeO+Fe₂O₃)/(MgO+FeO+Fe₂O₃); al' = Al₂O₃/(Fe₂O₃+FeO+MgO).

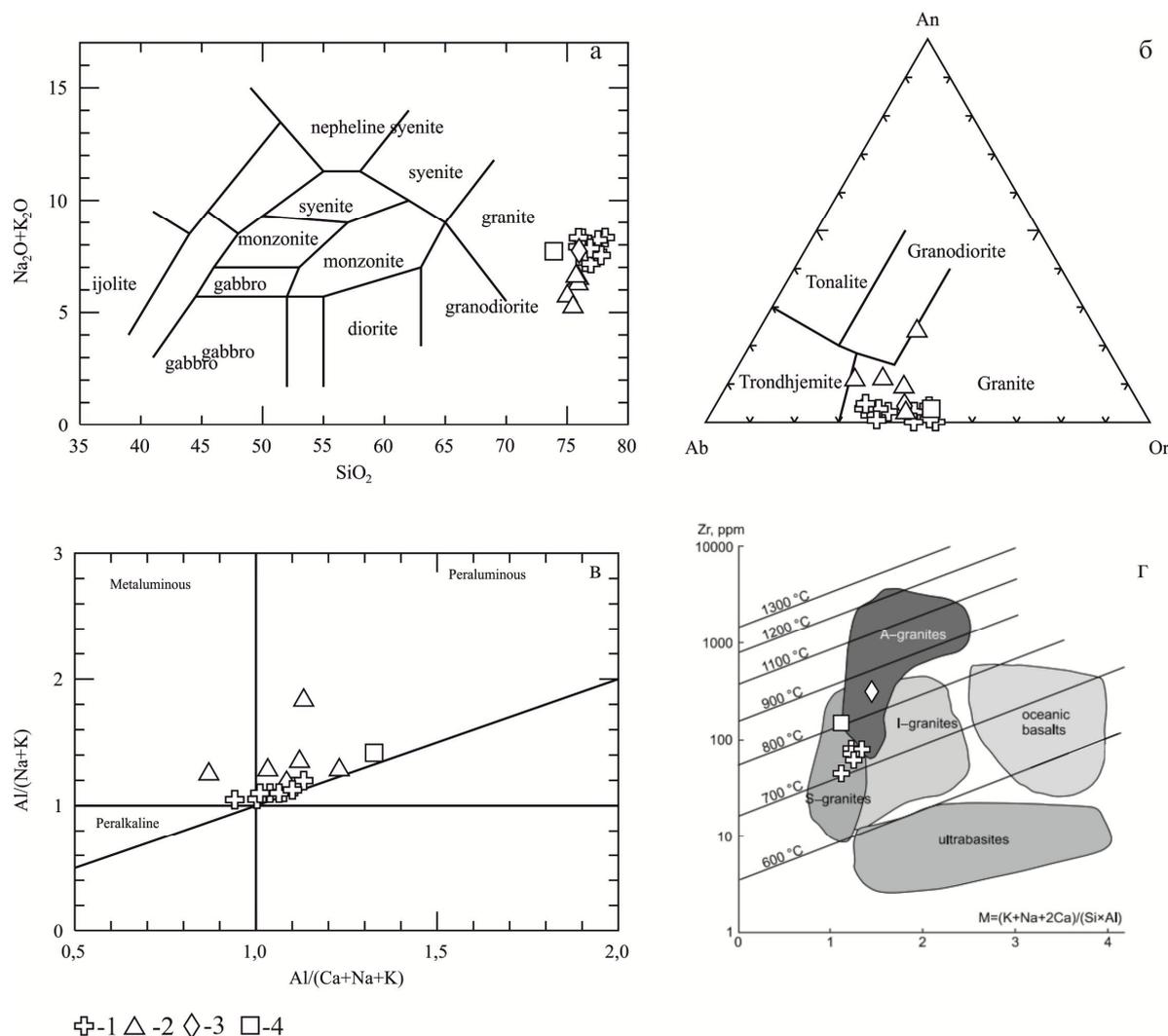


Рис. 2. Диаграммы $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (а), классификационная диаграмма О'Коннора (б), $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})/\text{Al}(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ (в), концентрации насыщения цирконием расплавов разного состава (параметр М) и генезиса при различных температурах по [15], экспериментальные данные по [16], экспериментальные данные по [17] (г). Условные обозначения: 1 – по данным Ю.В. Денисовой [12], 2 – по данным М.В. Фишмана, Б.А. Голдина [3], 3 – по данным Л.В. Махлаева [9], 4 – исследованная порода.
 Fig. 2. Diagrams $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ (a), O'Connor classification diagram (б), $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})/\text{Al}(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ (в), the zirconium saturation concentrations of the melts of different composition (parameter M) and genesis at different temperatures [15], experimental data after [16], experimental data after [17] (г). Legend: 1 – according to Yu.V. Denisova [12], 2 – according to M.V. Fishman, B.A. Goldin [3], 3 – according to L.V. Makhlaev [9], 4 – investigated rock.

вого материала в плавящийся субстрат (рис. 2, в). Точка состава на диаграмме Zr-M располагается на границе S и A-типов гранитов (рис. 2, г). Анализ петро-геохимических характеристик пород позволяет отнести их к А-типу гранитов. Полученные нами данные подтверждают более ранние работы Л.В. Махлаева [9], где показано, что по своим характеристикам граниты Кожимского массива сопоставимы с гранитами А-типа.

Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в породе низкое и составляет 99.95 г/т (табл. 1), в спектрах распределения РЗЭ (рис. 3, а) наблюдается небольшое преобладание легких РЗЭ над тяжелыми ($\text{La}_N/\text{Yb}_N \sim 3.3$), практически отсутствует Eu-аномалия ($\text{Eu}/\text{Eu}^* \sim 0.94$). На мультиэлементных диаграммах наблюдается преобладание

крупнокатионных элементов над высокозарядными элементами (рис. 3, б), отмечаются положительные аномалии Cs, K, U, Pb и отрицательные P, Ti. На диаграммах, применяемых для реконструкции геодинамических условий формирования пород, точки состава лежат в поле постколлизийных внутриплитных образований (рис. 4, а, б).

Цирконы, выделенные из гранита (проба 9-114) для геохронологических исследований, светло-желтые и медово желтые, прозрачные, коротко- и длиннопризматического габитуса, или обломки, размер кристаллов 50–100 мкм, Ку (коэфф. удлинения) 1:2. В отраженном свете поверхность гладкая. Католюминесцентные изображения со светлыми центральными зонами с просматриваемой зональностью и широкими черными каймами (рис. 5).

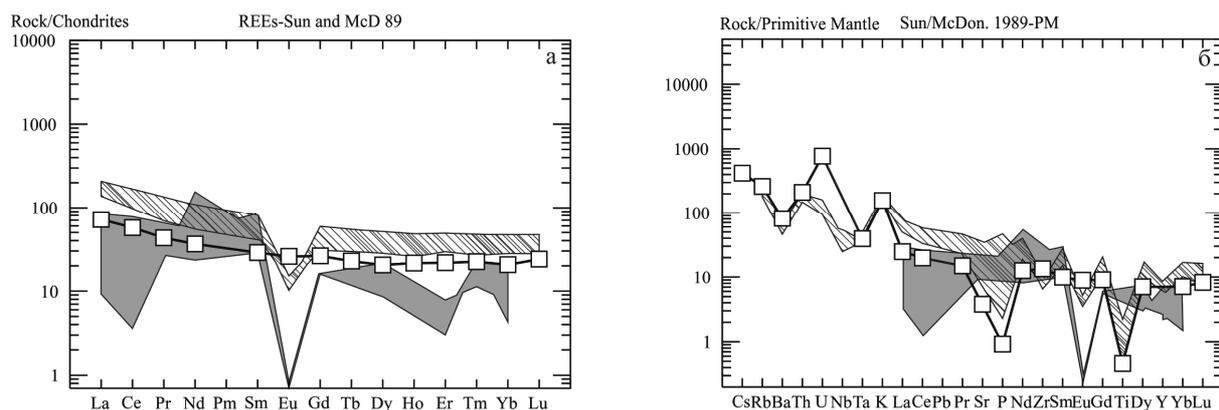


Рис. 3. Распределение РЗЭ в породах (а) и мультиэлементная диаграмма (б). На диаграммы нанесены профили спектров гранитоидов Кожимского массива: серое поле – данные Л. В. Махлаева [9], заштрихованное поле – данные Ю. В. Денисовой [12]. Белый квадрат – данные для датированного образца.
Fig. 3. REE distribution in rocks (a) and multi-element diagram (b). The diagrams show the profiles of the spectra of granitoids of the Kozhim massif, gray field – data of L.V. Makhlaev [9], shaded field – data of Yu.I. Denisova [12]. White square – data for the dated sample.

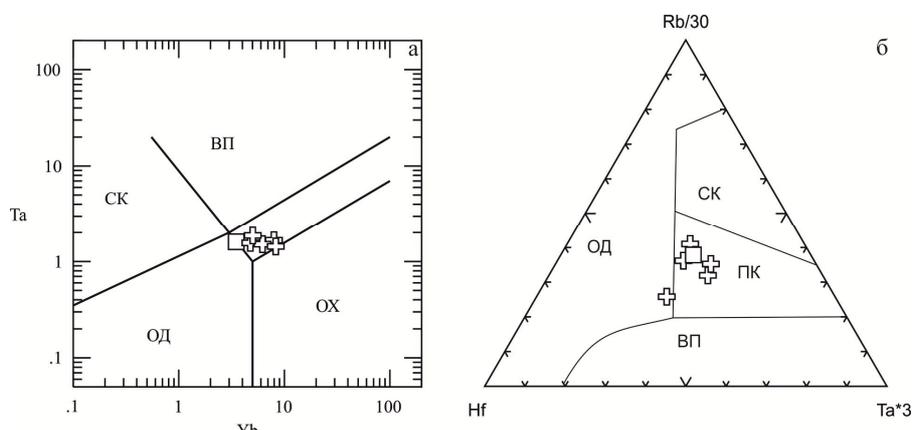


Рис. 4. Диаграммы Та-Уб, Hf-Rb / 30-Ta * 3 для реконструкции геодинамических обстановок формирования пород. Условные обозначения см. рис. 2.
Fig. 4. Diagrams Ta-Yb, Hf-Rb / 30-Ta * 3 for the reconstruction of geodynamic settings. Legend see Fig. 2.

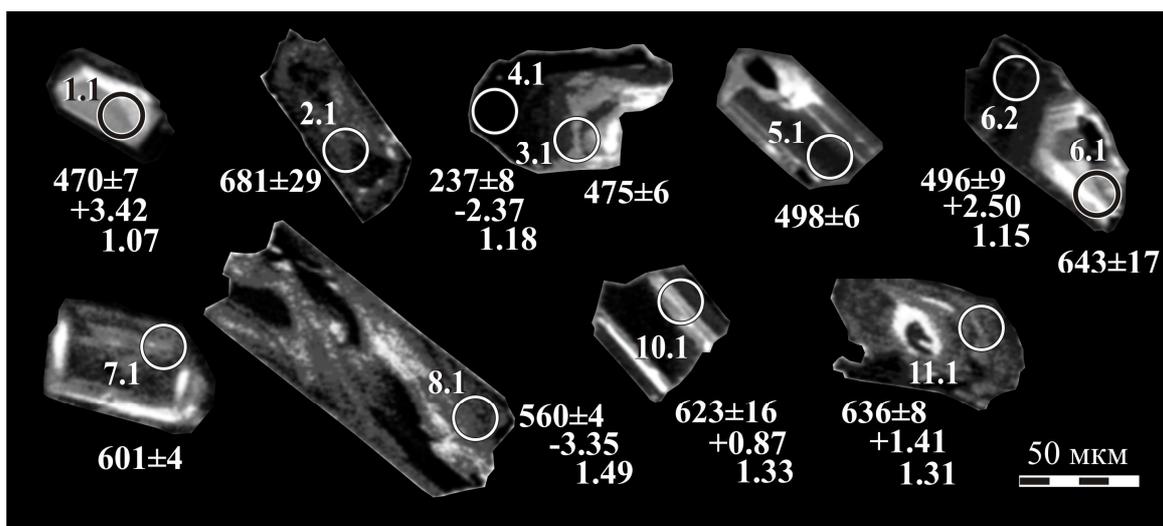


Рис. 5. Катодолуминесцентные изображения цирконов из пробы 9-114 с номерами датированных зерен, аналитическими кратерами, возрастом, данным εHf и модельным возрастом протолита – млрд лет.
Fig. 5. Cathodoluminescence image of zircon from sample 9-114 with numbers of dated grains, analytical craters, age, date of εHf and model age of protolith.

Был определен U-Pb возраст цирконов в 11 точках (табл. 2). Как видно из анализа табл. 2, для измеренных значений характерна высокая дискордантность, только три измеренных значения имеют дискордантность ниже 10% (7.1(601±4), 10.1 (623±16), 11.1 (636±8)), дискордантность 29–62% характерна для 36 % замеров (4.1 (237±8), 1.1 (470±7), 5.1 (498±6), 2.1 (681±29)). Исключив из расчета значения возраста в точках 2.1, 4.1, 8.1, полученные значения

возрастов образуют две основные группы (кластера) (рис. 6, а). Точки группируются: 1) 681–601 млн лет, точки 7.1, 10.1, 11.1, 6.1, 2.1; 2) 498–470 млн лет, точки 1.1, 3.1, 6.2, 5.1. Для каждой из групп был рассчитан возраст. Средневзвешенный возраст первой группы составил 619.8±9.1 млн лет, (СКВО=0.67, 2σ) для более древних цирконов (рис. 6, б). Средневзвешенный возраст для группы более молодых цирконов составляет 485.5±6.4 млн лет,

Таблица 2

Результаты U–Pb изотопных исследований цирконов

Table 2

Results of U-Pb isotope studies of zircons

| Зерно, кратер | ²⁰⁶ Pb _c , % | Содержания, мкг | | | ²³² Th/ ²³⁸ U | Возраст, млн лет. ±1σ | | D, % | Изотопные отношения, ±%. 1σ | | | Rh ₀ |
|---------------|------------------------------------|--------------------|------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------------|
| | | ²⁰⁶ Pb* | U | Th | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | |
| 4.1 | 20.51 | 104 | 3266 | 4048 | 1.28 | 237±8 | 612±1186 | +62 | 0.0603±54.9 | 0.31±55.0 | 0.037±3.5 | 0.1 |
| 1.1 | 2.81 | 19 | 303 | 152 | 0.52 | 470±7 | 772±500 | +41 | 0.0650±23.7 | 0.68±23.8 | 0.076±1.5 | 0.1 |
| 3.1 | 0.97 | 16 | 246 | 153 | 0.64 | 475±6 | 558±79 | +15 | 0.0588±3.6 | 0.62±3.8 | 0.076±1.2 | 0.3 |
| 6.2 | 0.25 | 20 | 293 | 178 | 0.63 | 496±9 | 408±49 | -22 | 0.0549±2.2 | 0.61±2.9 | 0.080±1.9 | 0.7 |
| 5.1 | 0.73 | 16 | 235 | 363 | 1.59 | 498±6 | 390±86 | -29 | 0.0545±3.8 | 0.60±4.0 | 0.080±1.2 | 0.3 |
| 8.1 | 3.67 | 19 | 249 | 38 | 0.16 | 560±4 | 882±265 | +38 | 0.0685±12.8 | 0.86±12.8 | 0.091±0.8 | 0.1 |
| 7.1 | 1.01 | 32 | 383 | 243 | 0.65 | 601±4 | 663±45 | +10 | 0.0617±2.1 | 0.83±2.2 | 0.098±0.7 | 0.3 |
| 10.1 | -0.02 | 25 | 285 | 233 | 0.84 | 623±16 | 594±29 | -5 | 0.0597±1.3 | 0.84±3.0 | 0.101±2.7 | 0.9 |
| 11.1 | -0.13 | 39 | 434 | 246 | 0.59 | 636±8 | 600±36 | -6 | 0.0599±1.6 | 0.86±2.1 | 0.104±1.3 | 0.6 |
| 6.1 | 2.95 | 22 | 240 | 149 | 0.64 | 643±17 | 544±300 | -19 | 0.0584±13.7 | 0.84±14.0 | 0.105±2.8 | 0.2 |
| 2.1 | 0.19 | 215 | 2238 | 1385 | 0.64 | 681±29 | 558±91 | -23 | 0.0588±4.2 | 0.90±6.2 | 0.111±4.5 | 0.7 |

Примечание. ²⁰⁶Pb_c и ²⁰⁶Pb* – обыкновенный и радиогенный свинец. Изотопные отношения и содержания ²⁰⁶Pb скорректированы по измеренному ²⁰⁴Pb. D – дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст} (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст} (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rh₀ – коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U.

Note. ²⁰⁶Pb_c and ²⁰⁶Pb* – ordinary and radiogenic lead. The isotopic ratios and contents of ²⁰⁶Pb are corrected for the measured ²⁰⁴Pb. D – discordance: $D = 100 \times [\text{age} (^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}) / \text{age} (^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}) - 1]$. Rh₀ is the correlation coefficient between errors in determining the isotopic ratios ²⁰⁶Pb / ²³⁸U and ²⁰⁷Pb / ²³⁵U.

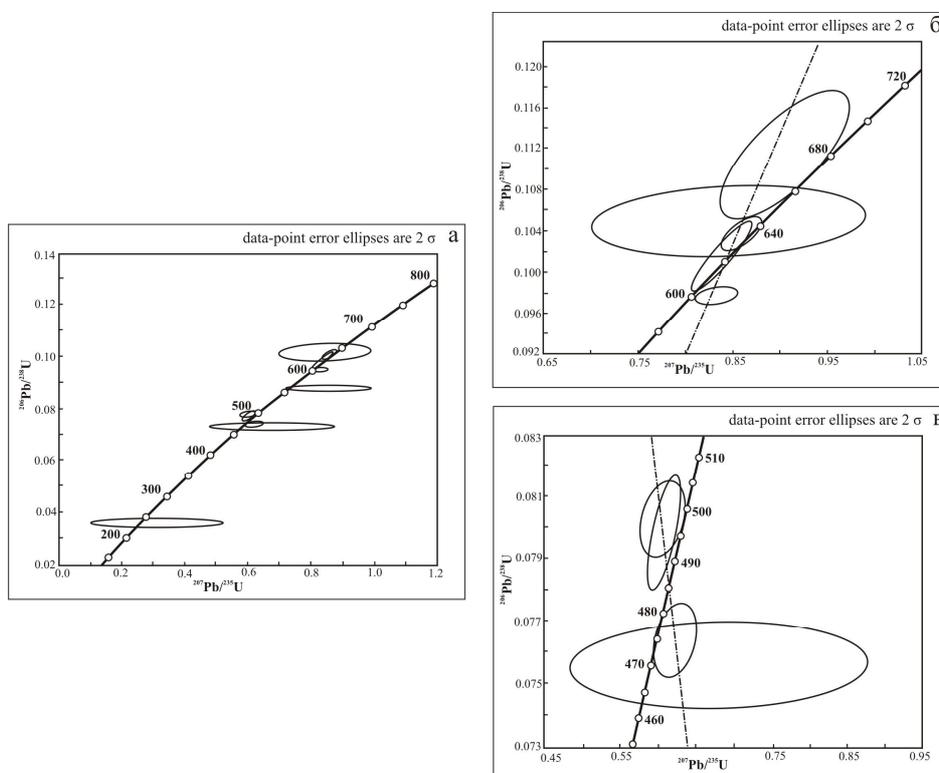


Рис. 6. Данные U-Pb возраста цирконов пробы 9-114, n=11 (а), значения (n=5) 619.8±9.1 млн лет, MSWD = 0.67 (б), значения (n=4) 485.5±6.4 млн лет, MSWD = 0.22 (в).

Fig. 6. U-Pb Zircon Age Data of sample 9-114, n=11 (a), values (n=5) 619.8±9.1 Ma, MSWD = 0.67 (б), values (n=4) 485.5±6.4 Ma, MSWD = 0.22 (в).

(СКВО=0.22, 2σ) (рис. 6, в). Возраст по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ для точки 4.1 определен как 237 ± 8 млн лет, для точки 8.1 – 560 ± 9.1 млн лет.

Содержания (г/т) U в цирконах первой группы варьируют от 240 до 434 (в точке 2.1 2238), Th (г/т) от 149 до 246 (2.1–1385), в цирконах второй группы U (г/т) от 235 до 293 и Th (г/т) от 38 до 363. Содержания элементов-примесей в цирконах разных возрастных групп близки (табл. 3, рис. 7), анализировались цирконы магматического генезиса. Поведение РЗЭ отличается в измеренных точках (4.1; 2.1; 8.1) с нарушенными характеристиками. На графике распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в точках продатированных цирконов (в скобках цифры возраста в млн лет) 4.1 (237), 2.1 (681), 8.1 (560), 1.1 (470) видно высокое содержание легких РЗЭ, указывающее на наложенные процессы изменения, например, метасоматического, гидротермального характера. Точки 4.1, 2.1, 8.1, исключенные из расчета возрастов в связи с высокой дискордантностью, обнаруживают высокое содержание легких РЗЭ. Кроме того, в точке 4.1 определено высокое содержание железа и нереально высокая расчетная температура кристаллизации, а для точки 2.1 характерно высокое содержание урана и тория.

Модельная температура кристаллизации, рассчитанная по содержанию титана [18], в продатированных цирконах находится в интервале 808–717°C для первой группы (более древних) и в интервале 868–742°C для второй, более молодой по возрасту (табл. 3), в среднем температура кристаллизации цирконов (или кайм цирконов) второй группы более высокая. Температурный интервал значений, полученный по насыщению цирконием расплава (рис. 2, г), составляет 804°C. Расчетные температуры (°C), основанные на исследовании морфологии кристаллов, близкие к нашим значениям, получены ранее для цирконов гранитоидов Кожимского массива в интервале 856–722 [12 и ссылки в этой работе].

Изотопный состав гафния был измерен в шести точках, в цирконах первой возрастной группы (измеренный в точках 10.1, 11.1) варьирует от +0.87 до +1.41 и указывает на корово-мантийный (гибридный, смешанный) источник, модельный возраст протолита T_{DM2} 1.33–1.31 млрд лет (табл. 4, рис. 8).

Таблица 3

Содержания редкоземельных элементов, иттрия, гафния, железа и титана (z/m) 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

| Точки | Y | La | Ce | Nd | Sm | Eu | Gd | Dy | Er | Yb | Hf | Fe | ^{48}Ti | ^{49}Ti | $T^{(1)}$ |
|-------|------|-------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|------|-------|------|------------------|------------------|-----------|
| 4.1 | 3055 | 68.54 | 201 | 45.7 | 28.7 | 6.33 | 91 | 317 | 563 | 1473 | 7197 | 3999 | 1361.3 | 1366.7 | 1843 |
| 1.1 | 2033 | 3.73 | 33 | 2.5 | 4.5 | 1.79 | 45 | 208 | 383 | 711 | 11571 | 52 | 14.2 | 14.3 | 857 |
| 3.1 | 1695 | 0.46 | 67 | 1.5 | 3.9 | 1.51 | 35 | 156 | 298 | 570 | 9346 | 97 | 10.2 | 9.6 | 819 |
| 6.2 | 1793 | 0.11 | 60 | 0.9 | 3.5 | 1.08 | 37 | 172 | 309 | 496 | 8784 | 1 | 4.7 | 4.6 | 742 |
| 5.1 | 3329 | 1.79 | 77 | 8.5 | 15.7 | 6.37 | 124 | 374 | 499 | 712 | 5864 | 12 | 15.7 | 15.7 | 868 |
| 8.1 | 752 | 0.28 | 2 | 1.0 | 1.6 | 0.13 | 16 | 76 | 120 | 185 | 12288 | 5 | 3.7 | 3.8 | 719 |
| 7.1 | 2194 | 0.14 | 16 | 1.6 | 4.9 | 0.88 | 53 | 230 | 401 | 651 | 11289 | 214 | 6.6 | 7.0 | 775 |
| 10.1 | 2070 | 0.09 | 28 | 3.7 | 7.3 | 1.56 | 59 | 223 | 367 | 581 | 9835 | 108 | 4.4 | 4.3 | 736 |
| 11.1 | 2004 | 0.02 | 19 | 1.0 | 3.7 | 0.69 | 44 | 203 | 366 | 617 | 12389 | 89 | 3.6 | 3.5 | 717 |
| 6.1 | 1254 | 8.31 | 41 | 2.3 | 3.1 | 1.32 | 30 | 114 | 200 | 337 | 6164 | 11 | 9.2 | 9.0 | 808 |
| 2.1 | 3159 | 8.35 | 39 | 6.0 | 11.4 | 2.70 | 104 | 346 | 530 | 894 | 8407 | 200 | 4.8 | 4.7 | 743 |

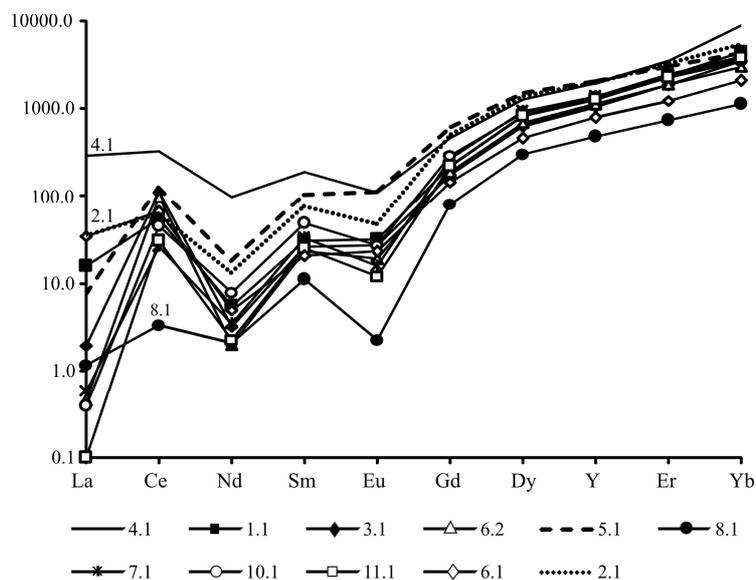


Рис. 7. Спектры распределения РЗЭ (нормированные на хондрит) в цирконах. Точки 2.1, 4.1, 8.1 – аномальные.

Fig. 7. REE distribution spectra (normalized to chondrite) in zircons. Points 2.1, 4.1, 8.1 – abnormal.

Изотопный состав Hf в цирконах

Hf isotope composition of zircons

| Зерно Grain | T (млн лет) T (Ma) | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | 2 σ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | 2 σ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | 2 σ | T _{DM} (млрд лет) T (Ga) | f(Lu/Hf) | $\epsilon\text{Hf}(0)$ | $\epsilon\text{Hf}(t)$ | T _{DM2} (млрд лет) T (Ga) |
|-------------|--------------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 4.1 | 237 | 0.068221 | 0.000288 | 0.282572 | 0.000029 | 0.002803 | 0.000011 | 1.01 | -0.92 | -7.07 | -2.37 | 1.18 |
| 1.1 | 470 | 0.058706 | 0.000350 | 0.282602 | 0.000028 | 0.002426 | 0.000017 | 0.96 | -0.93 | -6.03 | 3.42 | 1.07 |
| 6.2 | 496 | 0.043583 | 0.000275 | 0.282550 | 0.000018 | 0.001697 | 0.000013 | 1.01 | -0.95 | -7.84 | 2.50 | 1.15 |
| 8.1 | 560 | 0.027502 | 0.000200 | 0.282345 | 0.000021 | 0.001069 | 0.000008 | 1.28 | -0.97 | -15.11 | -3.35 | 1.49 |
| 11.1 | 636 | 0.048236 | 0.000256 | 0.282440 | 0.000026 | 0.001944 | 0.000010 | 1.18 | -0.94 | -11.73 | 1.41 | 1.31 |
| 10.1 | 623 | 0.081585 | 0.000823 | 0.282447 | 0.000032 | 0.003174 | 0.000029 | 1.21 | -0.90 | -11.50 | 0.87 | 1.33 |

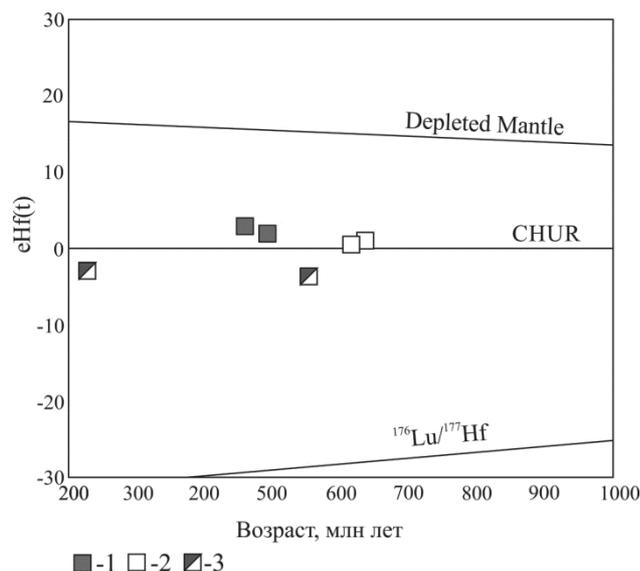


Рис. 8. Изотопный состав Hf. Условные обозначения: 1 – цирконы кембрий-ордовикского возраста; 2 – цирконы среднерифейского возраста; 3 – данные по цирконам, не вошедшим в расчет возраста.
Fig. 8. Isotopic composition of Hf. Legend: 1 – zircons of the Cambrian-Ordovician age; 2 – zircons of the Middle Riphean age; 3 – data on zircons not included in the age calculation.

Изотопный состав гафния в цирконах второй возрастной группы (1.1, 6.2) составляет +2.50 – +3.42, т.е. имеет чуть более мантийные характеристики и более молодой расчетный модельный возраст протолита T_{DM2} 1.15–1.07 млрд лет. В точках с нарушенными характеристиками 4.1 и 8.1 отмечены коровые значения ϵHf .

Обсуждение результатов

Долгое время возраст гранитоидов этого района был предметом широких дискуссий: доордовикский или послеордовикский. Отнесение пород массива к молодым верхнепалеозойским образованиям обусловлено появлением первых датировок абсолютного возраста, полученных K-Ar методом по слюдам на уровне 300 ± 15 млн лет [3]. Таким образом, на долгие годы возрастное положение гранитоидов было утверждено и закреплено в схеме корреляции магматических комплексов европейского Северо-Востока [11, 13]. Лишь намного позже, с

появлением новых методов абсолютного датирования, появились данные, указывающие на средне-рифейский, вендский, поздневендско-раннекембрийский возраст гранитоидов [1, 6–7]. Исследования единичных зерен цирконов, накопленные к настоящему моменту, убедительно показывают, что гранитоиды Кожимского массива содержат различные цирконы. Поскольку в выборках присутствуют цирконы с различными возрастами, установленный ранее по единичным цирконам U-Pb (SIMS) возраст 593 ± 3 млн лет [6] в южной части опробованного нами массива указывает, что в выборку попало больше цирконов с более древними возрастами. Отсутствие изображений цирконов в работе предшественников затрудняет дальнейший анализ. Полученные нами новые данные по цирконам пробы гранитов из северного контакта южного тела, собственно Кожимского массива по А.М.Пыстину, показывают, что процессы гранитогенеза проявились на уровне границы кембрия-ордовика, так как каймы имеют более молодой возраст, на 150–100 млн лет моложе ядер. Очень показателен продатированный кристалл циркона: точка 6.1 – центр и точка 6.2 – кайма, в центре возраст составляет 643 млн лет, а в кайме 496. Таким образом, если рассматривать центральные части циркона с более древними возрастами как время кристаллизации циркона из расплава, то возраст пород массива удревняется. Можно отметить, что согласно полученным данным гранитоиды формировались на уровне позднего кембрия – раннего ордовика, а более древние ядерные части или генерации цирконов с древними (позднерифейскими) возрастами наследованы, либо формирование пород происходило на уровне 640 млн лет, а преобразование или повторное плавление на уровне 500 млн лет. Возможно, появятся новые данные для решения этой проблемы. Полученные также в каймах молодые возраста, на уровне 300 млн лет, подтверждают имеющиеся цифры K-Ar датирования слюды и указывают, что в это время происходили неуставленные процессы (метаморфические, метасоматические, гидротермальные), отразившиеся в появлении генерации цирконов. Кроме того, показателен изменившийся геохимический состав этих цирконов.

Выводы

Исследовались нормальнощелочные лейкограниты северной части Кожимского массива. Установлено, что по своим минералого-петрографичес-

ким и петро-геохимическим характеристикам породы относятся к А-типу гранитов, с учетом полученных изотопно-геохронологических данных граниты формировались в постколлизийных переходных к рифтогенным геодинамическим условиям. В породах обнаружены две возрастные группы цирконов ~620 и ~490 млн лет. Цирконы (кристаллы и каймы кристаллов) отличаются возрастными, геохимическими, термическими, изотопными (Hf) характеристиками, а также расчетными модельными возрастными протолитов. Полученные новые данные показывают, что исследованные граниты с характеристиками гранитов А-типа могли формироваться на уровне границы кембрия и ордовика (485.5 ± 6.4), цирконы с возрастными 619.8 ± 9.1 млн лет нами рассматриваются как наследованные от предыдущего этапа. Полученное время в эволюции этой части Приполярного Урала коррелирует с рифтогенными геодинамическими условиями (520–480 млн лет), при которых выплавлялись граниты с характеристиками А-типа гранитов, последовавшими за надсубдукционно-аккреционными, коллизийными, синколлизийными и постколлизийными процессами (640–520 млн лет), при которых происходило формирование гранитоидов различных типов S, I, A [10, 19].

Авторы выражают благодарность М.А.Коблу (Стэнфордский университет, США) за возможность проведения U-Pb исследований, а также Ф. Мон и Ц. Ген (Китайская академия наук, г. Пекин и Институт геологии и минеральных ресурсов, г. Тяньцзинь, Китай) за предоставленную возможность исследования Lu-Hf системы цирконов.

Исследования выполняются в рамках госзадания № ГР АААА-А17-117121270035-0.

Литература

1. Иванов В.Н., Жаркова Т.Б., Курзанов И.Ю. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Серия Северо-Уральская. Лист Q-41-XXV. Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 252 с.
2. 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.
3. Фишман М.В., Голдин Б.А. Гранитоиды Центральной части Приполярного Урала. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 108 с.
4. Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Докембрий Приполярного Урала: хроностратиграфический аспект // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 2. С 34–52.
5. Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 6. С. 25–38.
6. 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. 2011. Вып. 4(8). С. 73–78.
7. Голдин Б.А., Калинин Е.П., Пучков В.Н. Магматические формации западного склона севера Урала и их минералогия. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1999. 214 с.
8. Голдин Б.А., Калинин Е.П. Доордовикский магматизм Севера Урала // Доордовикская история Урала. Свердловск, 1980. С. 3–30.
9. Махлаев Л.В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург, 1996. 150 с.
10. Андреичев В.Л. Геохронология гранитоидного магматизма Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2010. №11. С. 7–12.
11. Андреичев В.Л. Изотопная геохронология доуралитид Приполярного Урала. Сыктывкар, 1999. 48 с. (Серия сообщ. «Научные доклады»/ Коми научный центр УрО Российской академии наук; Вып. 413).
12. Денисова Ю.В. Термометрия насыщения циркона, апатита, монацита (Кожимский массив, Приполярный Урал) // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2019. №3(39). С. 47–52.
13. Корреляция магматических комплексов европейского Северо-Востока СССР/ В.Н.Охотников, В.И. Мизин, Л.Т. Белякова и др. Сыктывкар, 1985. 25 с.
14. 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.
15. 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. P. 1508–1513 (in Chinese with English abstract).
16. Hanchar J.M., Watson E.B. Zircon saturation thermometry // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2003. 53 (1). P. 89–112.
17. 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). P. 759–785.
18. 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.
19. Соболева А.А., Удоратина О.В. Доуральские гранитоиды на Урале // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2010. №9 (189). Вып. 2. С. 16–17.

References

1. Ivanov V.N., Zharkova T.B., Kurzanov I.Yu. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 200 000. Seriya Severo-Ural'skaya. List Q-41-XXV. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological

- map of the Russian Federation. Scale 1: 200 000. North Urals Series. Sheet Q-41-XXV. Explanatory note]. Moscow: MF VSEGEI, 2013. 252 p.
2. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Ural'skaya. Listy R-40 – Severoural'sk. Ob"yasnitel'naya zapiska* [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 p.
 3. *Fishman M.V., Goldin B.A. Granitoidy Tsentral'noy chasti Pripolyarnogo Urala* [Granitoids of the Central part of the Subpolar Urals]. Leningrad: USSR Ac. Sci. Publ., 1963. 108 p.
 4. *Pystin A.M., Pystina Yu.I. Dokembriy Pripolyarnogo Urala: khronostratigraficheskiy aspekt* [Precambrian of the Subpolar Urals: chronostratigraphic aspect] // Transactions of the Karelian Sci. Centre, RAS. 2019. №. 2. P. 34–52.
 5. *Pystin A.M., Pystina Yu.I. Metamorfizm i granitobrazovaniye v proterozoysko-rannepaleozoyskoy istorii formirovaniya Pripolyarnoural'skogo segmenta zemnoy kory* [Metamorphism and granite formation in the Proterozoic-Early Paleozoic history of the formation of the Subpolar Ural segment of the Earth's crust] // Lithosphere. 2008. №. 6. P. 25–38.
 6. *Pystin A.M., Pystina Yu.I. Novyye dannyye o vozraste granitoidov Pripolyarnogo Urala v svyazi s problemoy vydeleniya kozhimskoy srednerifeyskoy 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] // Proc. of the Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS. 2011. Issue 4 (8). P. 73–78.
 7. *Goldin B.A., Kalinin E.P., Puchkov V.N. Magmaticheskkiye formatsii zapadnogo sklona severa Urala i ikh minerageniya* [Magmatic formations of the western slope of the north of the Urals and their mineralogy]. Syktyvkar: Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS, 1999. 214 p.
 8. *Goldin B.A., Kalinin E.P. Doordovikskiy magmatizm Severa Urala* [Pre-Ordovician magmatism of the North of the Urals] // Pre-Ordovician history of the Urals. Sverdlovsk, 1980. P. 3–30.
 9. *Makhlaev 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)]. Ekaterinburg, 1996. 150 p.
 10. *Andreichev V.L. Geokhronologiya granitoidnogo magmatizma Pripolyarnogo Urala* [Geochronology of granitoid magmatism of the Subpolar Urals] // Bull. of the Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS. 2010. №. 11. P. 7–12.
 11. *Andreichev V.L. Izotopnaya geokhronologiya douralid Pripolyarnogo Urala* [Isotopic geochronology of duralids of the Subpolar Urals]. Syktyvkar, 1999. 48 p. (“Sci. reports” / Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS; Issue 413).
 12. *Denisova Yu.V. Termometriya nasyshcheniya tsirkona, apatita, monatsita* (Kozhimskiy massiv, Pripolyarnyy Ural) [Thermometry of saturation of zircon, apatite, monazite (Kozhim massif, Subpolar Urals)] // Proc. of the Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS. 2019. №3 (39). P. 47–52.
 13. *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.
 14. *Shuyskiy A. S., Udoratina O. V., Miller E. L., Coble M.A. Granites of the Gerdiz massif* (Polar Urals): new data // Bull. of the Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS. 2018. №12. P. 23–30.
 15. *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 Bull. of China 30 (10). 2011. P. 1508–1513 (in Chinese with English abstract)
 16. *Hanchar J.M., Watson E.B., 2003. Zircon saturation thermometry* // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 53 (1). P. 89–112.
 17. *Kostitsyn Y.A., Belousova E.A., Silant'ev S.A., Bortnikov N.S., Anosova M.O., 2015. Modern problems of geochemical and U-Pb geochronological studies of zircon in oceanic rocks* // Geochemistry International. 53 (9). P. 759–785.
 18. *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.
 19. *Soboleva A. A., Udoratina O. V. Doural'skiye granitoidy na Urale* [Pre-Ural granitoids in the Urals] // Bull. of the Inst. of Geology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS. Syktyvkar, 2010. №. 9 (189). Issue 2. P. 16–17.

Статья поступила в редакцию 28.12.2019.