



VENDIAN – EARLY CAMBRIAN GRANITES OF THE KRUTORECHENSKY COMPLEX (NORTHERN URALS, RUSSIA): PROTOLITH AGE, GEODYNAMIC CONDITIONS OF GENERATION AND TRANSFORMATION

A. V. Korovko¹, G. Yu. Shardakova¹, V. N. Puchkov¹, V. B. Khubanov^{2,3}

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

²Geological Institute, Siberian Branch of RAS, Ulan-Ude, Russia

³D. Banzarov Buryat State University, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The Main Uralian fault (MUF) zone is a suture at the junction of the Urals and the East European platform (EEP). Its complex tectonic melange is still poorly studied. We obtained new data on compositions and ages of the Krutorechensky granites (KG) composing an intensely tectonized and boudinaged elongated body discovered in meta-terrestrial and meta-volcanogenic rocks in the western part of the MUF zone. In chemical composition, these granites are similar to the Vendian-Cambrian collisional granitoids of the Isherim and Lyapin blocks. The LA-ICP-MS method was used to determine U-Pb zircon ages for the KG samples. The zircons contain ancient xenogenic cores (1221–1034 Ma) and young rims (400±6 Ma). The Middle Riphean ages of zircons from the protolith suggest that the KG block (belonging to the Prisolatim zone and located west of the MUF zone) is a fragment of the EEP, because the complexes of the Ordovician-Devonian Tagil paleo-island arc (located further eastward) are mostly dated to the Vendian. The KG crystallization age (537±2 Ma) is practically the first (Vendian) early Cambrian dating for the granites sampled in the MUF zone. Considering this age and the petrogeochemical features, there are grounds to suggest that the Krutorechensky granites originated due to tectonic-magmatic events (with possible pluming) that took place at the final stage of the Timan collision, similar to granites of the western slope of the Northern Urals (Moiva, Posmak and Velsov massifs). Subsequently, these granites were involved in the Paleozoic accretion-collision processes that created the modern MUF zone (i.e. tectonic melange). Our study results are important for clarifying the structure of the Urals-EEP junction zone and useful for geological mapping and metallogenic assessment of the region.

Key words: Main Uralian fault (MUF); accretion; granite; zircon; Vendian; Cambrian; Timan collision

RESEARCH ARTICLE

Received: April 9, 2019

Revised: June 24, 2019

Accepted: August 22, 2019

For citation: Korovko A.V., Shardakova G.Yu., Puchkov V.N., Khubanov V.B., 2019. Vendian – Early Cambrian granites of the Krutorechensky complex (Northern Urals, Russia): protolith age, geodynamic conditions of generation and transformation. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (4), 863–878. doi:10.5800/GT-2019-10-4-0446.

Funding: This study was carried out as part of fundamental research of A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS (state registration number AAAA-A18-118052590029-6) and the Geological Institute SB RAS (project IX.129.1.2, state registration number AAAA-A16-116122110027-2).

ВЕНД-РАННЕКЕМБРИЙСКИЕ ГРАНИТЫ КРУТОРЕЧЕНСКОГО КОМПЛЕКСА (ПРИСАЛАТИМСКАЯ ЗОНА, СЕВЕРНЫЙ УРАЛ): ВОЗРАСТ ПРОТОЛИТА, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

А. В. Коровко¹, Г. Ю. Шардакова¹, В. Н. Пучков¹, В. Б. Хубанов^{2,3}

¹ Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

³ Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, Улан-Удэ, Россия

Аннотация: Строение зоны Главного Уральского разлома (ГУР) – шовной (сутурной) области на стыке Урала и Восточно-Европейской платформы – до сих пор изучено довольно слабо, поскольку она является сложно построенным тектоническим меланжем. Нами получены новые данные о составе и возрасте гранитов крутореченского комплекса (КГК), слагающих интенсивно тектонизированное и будинированное удлиненное тело среди метатерригенных и метавулканогенных пород в западной части зоны ГУР. По химическому составу граниты сходны с венд-кембрийскими коллизионными гранитоидами Ишеримского и Ляпинского блоков. Методом LA-ICP-MS получен U-Pb возраст цирконов из гранитов КГК. В цирконах присутствуют древние ксеногенные ядра (1221–1034 млн лет) и молодые каймы (400±6 млн лет). Среднерифейские датировки в цирконах, заимствованных из протолита, позволяют предполагать, что блок, сложенный гранитами КГК, относящийся к Присалатимской зоне и расположенный западнее ГУР, может быть фрагментом ВЕП, поскольку в комплексах ордовикско-девонской Тагильской палеостровной дуги, находящейся восточнее, наиболее часто встречающийся возраст субстрата преимущественно вендский. Возраст кристаллизации гранитов КГК (537±2 млн лет) – это практически первая (венд) раннекембрийская датировка для гранитов в контурах зоны ГУР. Данный возраст и петрогеохимические особенности указывают на генерацию гранитов КГК в ходе тектоно-магматических событий завершающего этапа Тиманской коллизии подобно гранитам западного склона Северного Урала (Мойвинский, Посьмакский, Велсовский массивы), возможно, при участии плюма. Впоследствии граниты КГК были вовлечены в палеозойские аккреционно-коллизионные процессы, создавшие современный облик зоны ГУР (тектонический меланж). Результаты важны для уточнения строения зоны сочленения Урала с ВЕП, применяются для целей геологического картирования и металлогенических оценок.

Ключевые слова: Главный Уральский разлом; аккреция; гранит; циркон; венд; кембрий; тиманская коллизия

1. ВВЕДЕНИЕ

Установление характера взаимоотношений структурно-вещественных комплексов Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и эпипалеозойского Уральского покровно-складчатого пояса является ключевым в понимании истории формирования региона. Один из важных этапов в решении этой задачи – изучение магматических пород, в частности гранитоидных серий. Последние в зоне сочленения Урала с ВЕП широко распространены, их петрогеохимические особенности и возрастные датировки указывают на разнообразие геодинамических обстановок (рифтогенез, субдукция, аккреция, коллизия, коллапс) и их быструю смену во времени и пространстве [Kuznetsov et al., 2006, 2007a, 2014; Udoratina et al., 2006; Samygin et al., 2010; Puchkov, 2010, 2018; Soboleva et al., 2012; Petrov et al., 2014; Shardakova, 2016; Sobolev et al., 2017; и др.]. Наиболее сложная картина наблюдается в зоне Главного

Уральского разлома (ГУР), которая является областью аккреции и состоит из блоков разного состава, возраста и генезиса. История формирования, перемещения и трансформации многих фрагментов этой зоны еще до конца не ясна. В настоящей работе приводятся результаты изучения минералого-геохимических и изотопно-геохронологических особенностей гранитов крутореченского комплекса, слагающих блок в составе зоны ГУР. Эти новые данные позволяют корректировать представления о временных рамках региональных событий, палеогеодинамических обстановках и строении сложных окраинно-континентальных аккреционных зон.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ГРАНИТОИДОВ

Основной шовной структурой, отделяющей палеозойские образования Тагильской и Магнитогорской палеоокеанических зон Урала от протеро-

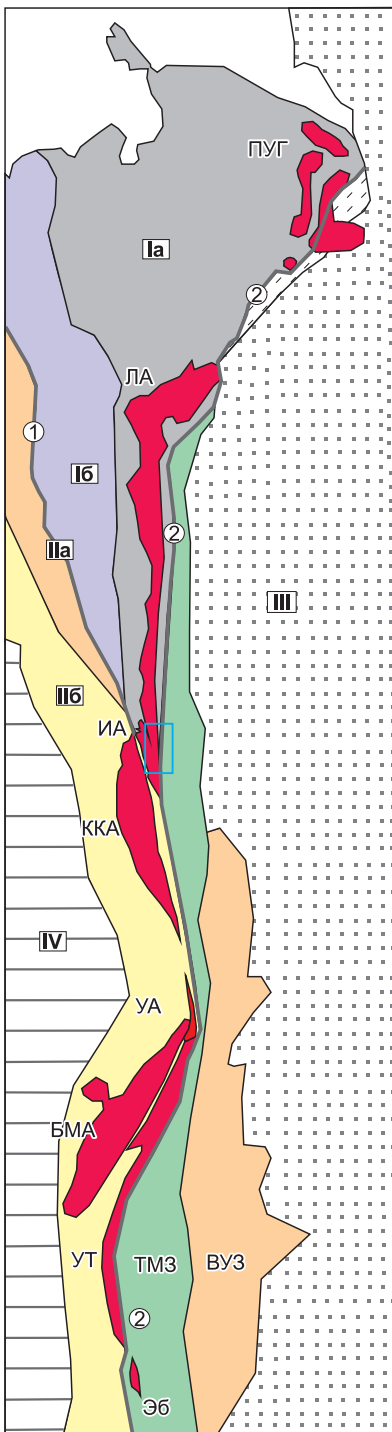


Рис. 1. Тектоническая схема Урала (по [Kuznetsov et al., 2006; Puchkov, 2010] с дополнениями).

Зоны разломов (цифры в кружках): 1 – Припечоро-Ильч-Чикшинская зона, 2 – Главный Уральский разлом. Мегазоны: ТМЗ – Тагило-Магнитогорская мегазона, ВУЗ – Восточно-Уральская мегазона. Блоки с древним фундаментом: ПУГ – Полярноуральская группа, включающая поднятия: Хараматалоу, Собское (с Енгапепэ, Манитанырд-Пайпудынским и Харбейским выступами), Оченьырское; ЛА – Ляпинский антиклинорий; ИА – Ишеримский антиклинорий; ККА – Кваркушко-Каменногорский антиклинорий; УА – Уфалейский антиклинорий (блок); БМА – Башкирский мегантиклинорий; УТ – Уралтау; Эб – Эбетинская антиформа. Большая Земельская зона: Iа – Большая Земельский и Iб – Печорский мегаблоки. Тиманская зона: IIа – Ижемский и IIб – Тиманский мегаблоки. Платформы: III – Западно-Сибирская и IV – Восточно-Европейская. Синим квадратом показано положение района работ (рис. 2).

Fig. 1. Schematic map of the Urals tectonics (modified after [Kuznetsov et al., 2005; Puchkov, 2010]).

Fault zones (numbered): 1 – Pri-Pechora-Ilych-Chiksha zone, 2 – Main Uralian fault. TMZ – Tagil-Magnitogorsk megazone; ВУЗ – Eastern Ural megazone. Blocks with the ancient basement: ПУГ – Polar Ural group, including the Kharamatalou, Soba (including the Enganepe, Manitanyrd-Paipudyn and Kharbey ledges) and Ochenyrd uplifts; ЛА – Lyapin anticlinorium; ИА – Ishirim anticlinorium; ККА – Kvarkush-Kamennogorsk anticlinorium; УА – Ufaley anticlinorium (block); БМА – Bashkir meganticlinorium; УТ – Uraltau; Эб – Ebetin antiform. Bolshaya Zemlya zone: Iа – Bolshaya Zemlya megablock, Iб – Pechora megablock. Timan zone: IIа – Izhem megablock, IIб – Timan megablock. Platforms: III – West Siberian, IV – East European. Blue box – study area (see Fig. 2).

зойских и палеозойских толщ ВЕП, является зона ГУР (рис. 1), имеющая сложное гетерогенное строение [Puchkov, 2010]. Часть данной зоны, являющаяся районом наших работ, состоит из ряда тектонических блоков и пакетов (рис. 2).

На восточном склоне Северного Урала в верховьях р. Вагран осевая часть зоны ГУР (Салатимская сutura) выполнена тектонитами, условно отнесенными авторами карты [Zhdanov, 2009] к войкаро-кемпирсайскому комплексу (D₃-Pvk), и с востока ограничивает Ишеримский мегаблок, считающийся вы-

ступом допалеозойского основания Урала либо частью Тиманского орогена [Petrov et al., 2015] (см. рис. 1, рис. 2). Восточная часть Ишеримского мегаблока входит в Присалатимскую подзону и сложена следующими, падающими на восток, образованиями: метатерригенными породами верхнерифейской велсовской и верхнекембрийско-нижнеордовикской саранхапнерской свит, метавулканогенно-осадочными породами ордовикской хомасьинской свиты [Zhdanov, 2009] (рис. 2). В строении Салатимской и Присалатимской подзон участвуют тектонизиру-

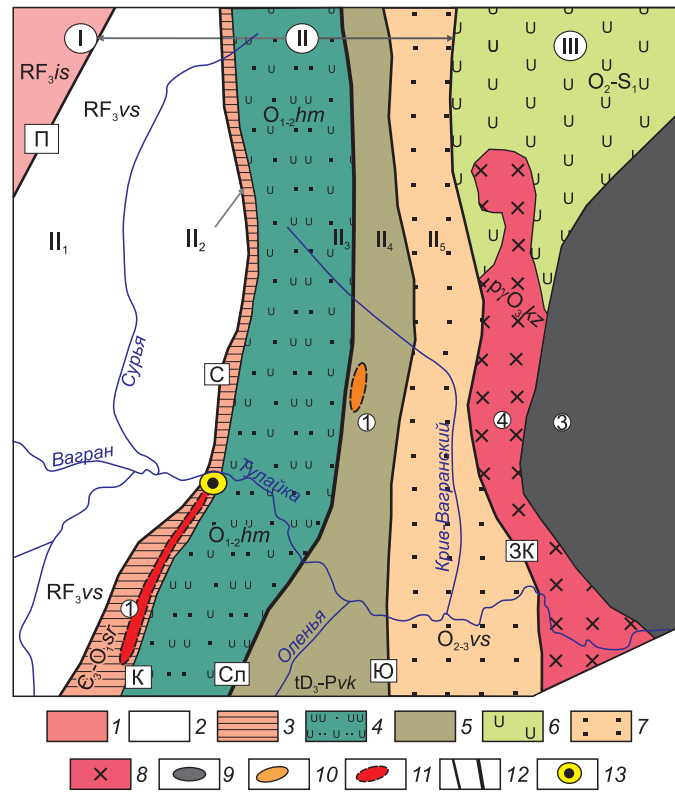


Рис. 2. Схема геологического строения района работ (верховья р. Вагран), масштаб 1:200000. По [State Geological Map, 2006], дополнен с учетом новых свит по [Zhdanov, 2009] и представлений авторов.

Разломы (буквы в квадратах): П – Поповский, С – Сосьвинский, К – Крутореченский, СЛ – Салатимский, Ю – Юртинский, ЗК – Западнокумбинский. Главные структуры, тектонические блоки (римские цифры в кружках), пакеты и слагающие их свиты: I – Ишеримский мегаблок, Сосьвинский блок: 1 – ишеримская метатерригенная свита RF₃iš; II – Салатимская сутурная зона: II₁ – Хозатумпский блок: 2 – велсовская метатерригенная свита RF₃vs, II₂ и II₃ – Присалатимский блок: II₂ – Крутореченский пакет: 3 – саранхапнерская метатерригенная свита E₃-O₁sr, II₃ – Латинско-Киришский пакет: 4 – хомасьинская метавулканогенно-осадочная свита O₁₋₂hm, II₄ – Тальтийско-Оленевский блок, Салатимская зона смятия, 5 – D₃-Pvk, войкаро-кемпирсайский тектоногенный комплекс, II₅ – Крив-Вагранский блок: 6 – выйская метавулканогенная свита O₂₋₃vs; III – Тагильский мегаблок: 7 – нерасчлененные образования O₂-S₁. Массивы и комплексы (арабские цифры в кружках): 1 – Крив-Вагранский сиенитовый массив и 2 – крутореченский гранитный комплекс (имеют тектонические границы, обозначенные пунктирной линией); 3 – Кумбинский полиформационный массив; 4 – Вагранский гранит-плагиогранитный массив. Тела, сложенные породами: 8 – сиенитами, 9 – габбро, перидотитами, 10 – плагиогранитами, 11 – лейкогранитами; 12 – разрывные нарушения разных порядков; 13 – местоположение скв. ПС-28.

Fig. 2. Schematic map showing the geological structure of the study area (the upper reaches of the Vagran River), scale 1:200000 (after [State Geological Map, 2006]). Newly described suites are shown according to [Zhdanov, 2009] and the authors' data.

Faults (marked by letters in squares): П – Popov, С – Sosva, К – Krutorechensky, СЛ – Salatim, Ю – Yurta, ЗК – West Kumba. Main structures, tectonic blocks, strata, suites (Roman numerals in circles): I – Isherim megablock, Sosva block: 1 – Isherim meta-terrigenous suite RF₃iš; II – Salatim suture zone: II₁ – Khozatump block: 2 – Velsov meta-terrigenous suite RF₃vs, II₂ and II₃ – Pri-Salatim block: II₂ – Krutorechensky strata: 3 – Sarankhapner meta-terrigenous suite E₃-O₁sr, II₃ – Latin-Kirshil strata: 4 – Khomasin meta-volcanogenic-sedimentary suite O₁₋₂hm, II₄ – Taltsiy-Olenev block, Salatim deformation zone, 5 – D₃-Pvk, Voikar-Kempirsai tectonogenic complex, II₅ – Kriv-Vagran block: 6 – Vyaya meta-volcanogenic suite O₂₋₃vs; III – Tagil megablock: 7 – undivided formations O₂-S₁. Massifs and complexes (Arabic numerals in circles): 1 – Kriv-Vagran syenite massif, 2 – Krutorechensky granite complex (tectonic boundaries shown by dashed lines); 3 – Kumba poly-formational massif; 4 – Vagran granite-plagiogranite massif. Other rock bodies: 8 – syenite, 9 – gabbro, peridotite, 10 – plagiogranite, 11 – leukogranite; 12 – faults of various ranks; 13 – location of well ПС-28.

ванные метавултрабазиты. Все породы обеих подзон подвергнуты зональному метаморфизму дистен-силлиманитовой, затем – глаукофан-сланцевой и зеленосланцевой фаций.

На правом борту долины р. Вагран, западнее ее правого притока – р. Крутой, горными и буровыми

выработками среди тектонически перемежающихся образований саранхапнерской и хомасьинской свит на протяжении 2 км прослежен ряд субогласных линзовидных тел (мощностью от 1 до 20–30 м) катаклазированных гранит-порфиров. По мере удаления от центров этих тел они постепенно переходят

дят в бластомилониты гранитного состава. Ассоциация гранитов и метагранитов выделена в крутореченский гранит-лейкогранитовый комплекс (КГК) [Korovko et al., 2017]. Наименее измененные породы последнего вскрыты рядом скважин, близких в пространстве; скв. 27 отмечена на рис. 2 и имеет координаты 60°03'14" с.ш., 59°17'09" в.д. Породы КГК представлены гнейсовидными гломеропорфиrowыми кварц-биотит-полевошпатовыми разностями. «Очковые» (до 5–7 мм) выделения пертитового калишпата, реже – шахматного альбита и более мелкие округлые вкрапленники кварца погружены в полосчатый мелко- и тонкозернистый базис, состоящий из кварц-полевошпатового агрегата, мусковита, биотита, часто замещаемого хлоритом, лейкоксеном, стильпномеланом. Акцессории – апатит, алланит, титанит, циркон. Полевые шпаты слабо пелитизированы.

3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Анализы на главные компоненты и элементы-примеси выполнены в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург). Содержания петрогенных элементов измерялись на спектрометрах СРМ-18 и EDX-900 HS. Fe₂O₃, K₂O определены рентгеноспектральным флуоресцентным методом, FeO, Na₂O, п.п.п. – методом «мокрой» химии. Анализы на элементы-примеси выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном спектрометре ELAN-9000 (PerkinElmer) с использованием аргона. Точность анализа составляет 0.1–1.0 отн. % (для разных уровней содержаний элементов).

Выделение цирконов из пород производилось в ИГГ УрО РАН по удельному весу в тяжелых жидкостях, с последующей ручной разборкой под бинокляром.

Изотопно-геохронологические исследования выполнены в ЦКП «Аналитический центр минералогического химического и изотопных исследований» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Определение U-Pb изотопного возраста проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с применением лазерной абляции (LA-ICP-MS) на базе магнитно-секторного масс-спектрометра Element XR с приставкой лазерного пробоотбора UP-213 [Khubanov et al., 2016; Buyantuev et al., 2017]. В качестве внешнего стандарта измерялись эталонные цирконы 91500 (1065 млн лет) [Wiedenbeck et al., 1995], в качестве контрольного образца – эталоны Plešovice (337 млн лет) [Sláma et al., 2008] и GJ-1 [Jackson et al., 2004]. Относительные погрешности измерения изотопных ²⁰⁸Pb/²³²Th, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U отношений в контрольных образцах варьировались в

пределах 1–3 %. Значения относительной погрешности средневзвешенных конкордантных возрастов цирконов Plešovice и GJ-1, определенных LA-ICP-MS методом, составляли менее 2 % от аттестованного значения их возраста. В качестве внешнего стандарта измерялись эталонные цирконы 91500 (1065 млн лет) [Wiedenbeck et al., 1995], в качестве контрольного образца – эталоны Plešovice (337 млн лет) [Sláma et al., 2008] и GJ-1 [Jackson et al., 2004]. Относительные погрешности измерения изотопного отношения ²⁰⁶Pb/²³⁸U варьировались в пределах 2–3 % и ²⁰⁷Pb/²³⁵U – 2.5–6.0 %, за исключением одного определения. Значения относительной погрешности средневзвешенных конкордантных возрастов цирконов Plešovice и GJ-1, определенных LA-ICP-MS методом, составляли менее 2 % от аттестованного значения их возраста.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. СОДЕРЖАНИЯ ПЕТРОГЕННЫХ И ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГРАНИТАХ КГК

Содержание петрогенных и редких элементов в породах КГК приведено в табл. 1. По химическому составу породы КГК соответствуют гранитам и лейкогранитам, относятся к умеренно-щелочному ряду (Na₂O+K₂O – 7.79–9.65 мас. %), имеют калиево-натриевый тип щелочности (Na₂O/K₂O – 0.64–0.70), по содержанию K₂O являются высококалиевыми (4.70–5.69 мас. %), а по соотношению алюминия и щелочных металлов отвечают пералюминиевым гранитоидам [Shand, 1943]. Важными особенностями состава гранитов КГК являются обедненность их CaO (0.62–0.95 мас. %) и обогащенность Rb (202–231 г/т).

В породах КГК суммарные содержания РЗЭ составляют 104–270 г/т, отмечается (рис. 3) слабое обогащение легкими РЗЭ относительно тяжелых РЗЭ (La_N/Yb_N 4–10) и дефицит Eu (Eu_N/Eu_N* 0.2–0.4). Фиксируются довольно устойчивые содержания LILE (г/т): Rb (200–230), Cs (1.5–1.9), Ba (324–370 до 353), Sr (30–40) и HFSE: Sc (4–5), Y (12–30), Th (12–19), U (4.4–8.5), Zr (91–133), Hf (3–4), Nb (12–16), Ta (1.7–2.1). На спайдерграммах, нормированных к базальтам срединно-океанических хребтов (БСОХ), наблюдаются минимумы по Ba, U, Nb, Ti и максимумы по K, Rb, иногда по Zr, Th, Gd.

4.2. МОРФОЛОГИЯ И СТРОЕНИЕ ЦИРКОНОВ

Для датирования КГК из наименее метаморфизованных гранит-порфиров КГК, вскрытых скв. ПС-28 на глубине 78 м, были отобраны пробы, из которых извлечены цирконы (рис. 4). Большинство

Т а б л и ц а 1. Содержания петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в гранитах крутореченского комплекса

Table 1. Concentrations of petrogenic (wt %) and rare (g/t) elements in granites of the Krutorechensky complex

№	27/40	27/41	28/69	28/78
SiO ₂	71.41	75.25	75.47	72.01
TiO ₂	0.22	0.16	0.16	0.17
Al ₂ O ₃	14.65	12.55	12.75	14.34
Fe ₂ O ₃	1.48	1.06	0.85	0.87
FeO	0.50	0.50	0.50	0.90
MnO	0.04	0.04	0.03	0.04
MgO	0.52	0.44	0.33	0.61
CaO	0.62	0.95	0.71	0.88
Na ₂ O	3.96	3.09	3.16	3.22
K ₂ O	5.69	4.70	4.89	5.07
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.04	0.03
Li	9.53	7.53	3.70	4.49
Rb	231	202	225	228
Cs	1.92	1.52	1.55	1.50
Be	2.81	2.57	2.44	2.61
Sr	32.53	35.61	30.41	40.24
Ba	368	324	338	535
Sc	5.32	4.68	4.23	4.47
V	13.91	10.93	12.94	14.32
Cr	9.32	8.42	9.93	13.75
Co	1.77	1.53	1.92	1.69
Cu	3.7	3.24	4.12	3.63
Zn	17.13	17.42	13.71	14.76
Ga	16.69	14.22	14.51	17.32
Y	31.02	30.98	26.82	12.22
Nb	16.4	12.66	14.27	14.74
Ta	2.08	1.72	1.64	2.06
Zr	133	91.6	107.00	110
Hf	4.37	3.01	3.60	3.95
Mo	0.12	5.01	0.43	0.11
Pb	7.95	5.24	19.61	7.37
U	4.37	6.41	5.54	8.56
Th	18.39	12.41	17.38	15.44
La	24.22	23.5	29.26	19.54
Ce	52.42	50.76	62.84	44.67
Pr	6.13	5.93	7.51	5.33
Nd	22.09	21.32	27.16	19.81
Sm	4.79	4.42	6.00	4.45
Eu	0.55	0.49	0.58	0.41
Gd	4.74	4.24	5.08	3.35
Tb	0.81	0.71	0.77	0.42
Dy	5.17	4.78	4.24	2.23
Ho	1.12	1.03	0.82	0.45
Er	3.29	3.26	2.58	1.41
Tm	0.55	0.55	0.45	0.28
Yb	3.63	3.52	3.03	1.67
Lu	0.55	0.52	0.46	0.30

зерен имеют длину 100–500 мкм и по кристаллографическим очертаниям, облику, окраске и внутреннему строению могут быть разделены на две группы: 1) прозрачные, бледно-розовые уплощенные зерна с коэффициентом удлинения (K_y) около 3 и тонкой концентрической зональностью роста, которая видна на CL-изображениях (рис. 4); 2) мут-

ные, розово-коричневые, бипирамидально-призматические, более короткие ($K_y=1-2$) зерна с зональностью роста и хорошо выраженными ядрами, имеющими элементы собственного внутреннего строения и границы, несогласные с ориентировкой зональности промежуточных и краевых частей кристаллов. В промежуточных зонах цирконов нерав-

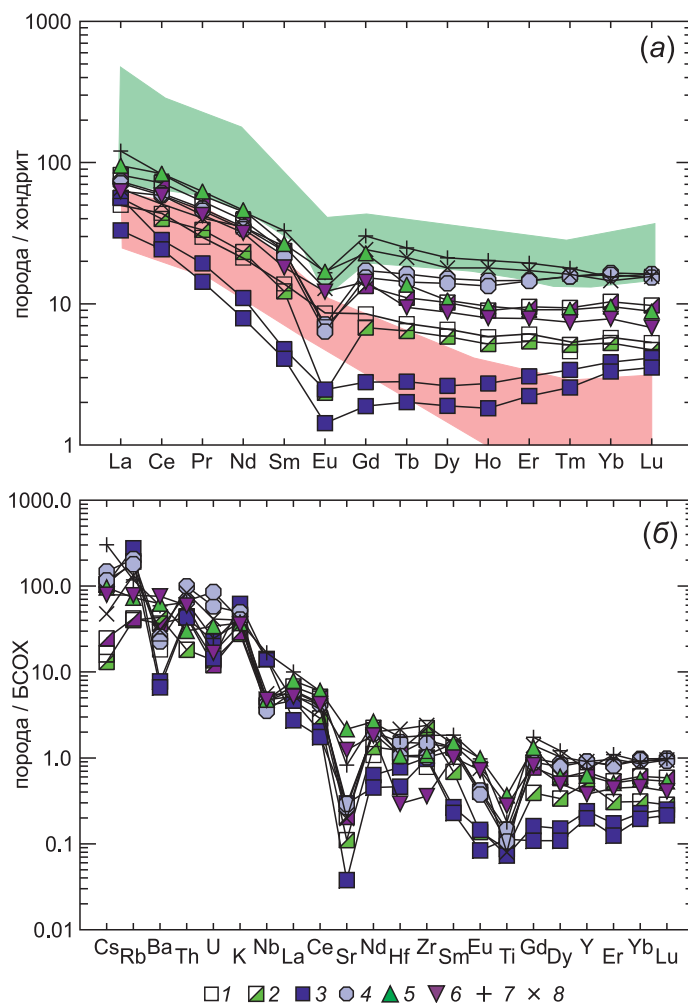


Рис. 3. Распределения РЗЭ (а) и элементов-примесей (б) в гранитоидах севера Урала. Условные обозначения см. на рис. 2. Для сравнения приведены поля средне-рипеевских гранитов Башкирского мегантиклинория (зеленое поле) и каменноугольных раннеорогенных гранитов Урала (розовое поле) [Shardakova, 2016]. Содержания элементов нормированы к хондриту CI (а) [Sun, 1982] и к BCOX (б) [Sun, McDonough, 1989].

Fig. 3. Distributions of REE (a) and impurity elements (b) for the Northern Ural granitoids. See Fig. 2 for the legend. For comparison, the following fields are shown: green – Middle Riphean granites of the Bashkir mega-anticlinorium, pink – Carboniferous early orogenic granites of the Urals [Shardakova, 2016]. Concentrations are normalized to chondrite CI (a) [Sun, 1982] and MORB (mid-oceanic ridge basalts) (b) [Sun, McDonough, 1989].

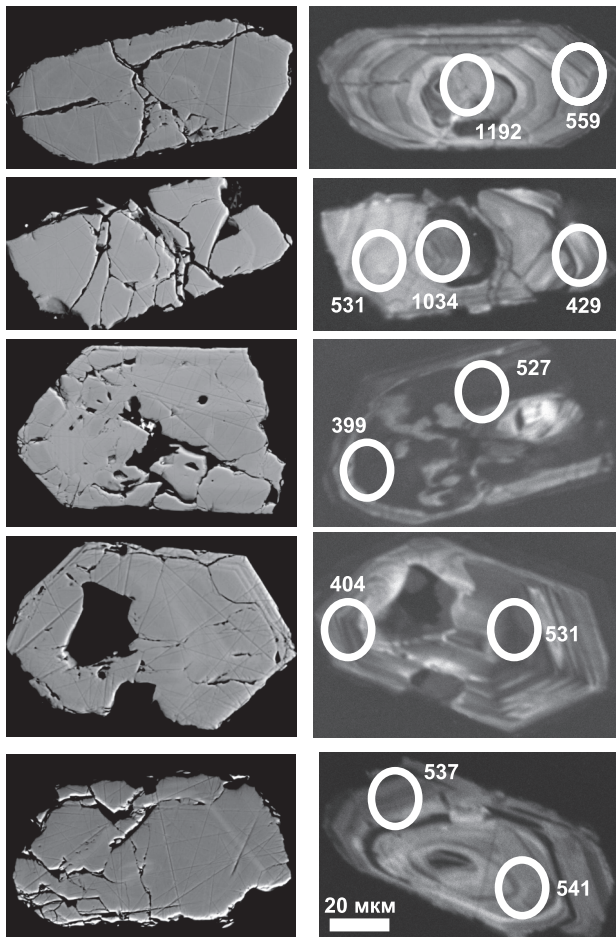


Рис. 4. Катодолуминесцентные изображения (слева) и изображения в режиме упругоотраженных электронов (справа) цирконов из гранитов КГК. Кружками показано расположение кратеров абляции, рядом приведены цифры возраста.

Fig. 4. Cathodoluminescent (left) and elastically reflected electron (right) images of zircons from the Krutorechensky granites. Circles and numbers – locations of ablation craters and ages.

номерно расположены неоднородные измененные участки. В ряде случаев вокруг «древних» ядер наблюдаются «футляры» с тонкой осцилляционной зональностью роста (вероятно, они образованы в ходе роста из магматического расплава). Большая часть зерен этого типа разбита сетью трещин. Имеются единичные обломки неправильной формы.

4.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ДАТИРОВАНИЯ

Были датированы зерна циркона из гранитоидов и гнейсов КГК, произведено 44 измерения. Расчет средневзвешенного возраста (СВЗ) проводился по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ отношению с коррекцией на нерадио-генный свинец ^{207}Pb -методом, при этом исключены

данные с D (коэффициент дискордантности) более 10 % (табл. 2) и отличающиеся на размер погрешности от среднего значения возраста по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ отношению с ^{207}Pb -коррекцией.

В цирконах из гранитов КГК фиксируются три возрастных кластера (рис. 4, 5):

1) четко ограниченные ядра ($\text{Th}/\text{U}=0.01\text{--}0.65$), имеющие древний возраст (см. пр. 6, 23, 25 в табл. 2) – 1034, 1192 и 1221 млн лет. Среди трех замеров в одном $D>10\%$. Ввиду этого конкордантный возраст и СВЗ по данной группе считать не вполне корректно. Для наглядности общего разброса датировок рядом с общей конкордией (рис. 5) приведены цифры возраста (с учетом погрешностей, 1σ) по двум замерам для цирконов данного кластера;

2) «футляровидные» зоны вокруг древних ядер, а также собственные зерна магматогенного облика, и те, и другие – с тонкой осцилляционной зональностью роста и $\text{Th}/\text{U}=0.29\text{--}1.37$. Внутренние части этих образований имеют возраст 528–595 млн лет, внешние – 525–586 млн лет; СВЗ=537±2 млн лет (рассчитан по всей группе);

3) внешние каймы зональных зерен или близкие к краям зерен участки сложного зонального строения ($\text{Th}/\text{U}=0.07\text{--}1.44$) с возрастом 369–429 млн лет; СВЗ=400±6 млн лет.

5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

5.1. ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГРАНИТОВ КГК

По поведению петрогенных элементов граниты КГК почти аналогичны венд-кембрийским гранитоидам Ишеримского (Мойвинский, Посьмакский, Велсовский массивы) и Ляпинского блоков [Kuznetsov et al., 2006, 2007a, 2007b; Petrov et al., 2014], природа и геодинамические условия внедрения которых обсуждаются ниже (раздел 5.3). Отметим также, что гранитоиды КГК по составу близки к среднему составу континентальной коры (по [Rudnick, Gao, 2003]). Существенная роль корового компонента в субстрате подтверждается нашими предварительными, неопубликованными изотопными данными (ξNd около -6 , I_{Sr} порядка 0.79). Первичные отношения изотопов Sr в гранитах Ляпинского блока, как и в случае КГК, указывают на их «коровую» природу [Dovzhikova et al., 2000].

На диаграммах, применяемых для генетической классификации гранитоидов [Whalen et al., 1987], большая часть точек составов пород КГК (как и части гранитов Ишеримского и Ляпинского блоков) лежит в полях гранитов М-, S-, I-типа (рис. 6, б). Точки составов гранитов КГК на диаграммах Дж. Пирса (рис. 6, а) [Pearce, Norry, 1979; Pearce et al., 1984] располагаются в полях составов гранитоидов,

Т а б л и ц а 2. Результаты определения изотопного состава и U-Pb возраста цирконов из гранитов крутореченского комплекса
 Table 2. The results of determining the isotopic composition and U-Pb age of zircons from granites of the Krutorechensky complex

№ пр.	Th/U ±1σ	Изотопные отношения			Rho	Возраст, млн лет		D, %	207Pb-контр.					
		207Pb/235U ±1σ	206Pb/238U ±1σ	207Pb/235U ±1σ		206Pb/238U ±1σ								
1	0.49	0.02	0.4870	0.0189	0.0640	0.0016	0.6	403	13	400	10	0.7	400	10
2	0.83	0.03	0.7028	0.0190	0.0855	0.0020	0.9	541	11	529	12	2.2	528	12
3**	0.47	0.02	0.9975	0.0261	0.1019	0.0024	0.9	703	13	625	14	12.3	618	14
4	0.36	0.01	0.7230	0.0227	0.0860	0.0021	0.8	552	13	532	12	3.8	530	13
5	0.32	0.01	0.6959	0.0230	0.0859	0.0021	0.7	536	14	531	12	0.9	531	13
6**	0.65	0.02	2.1920	0.0581	0.1774	0.0042	0.9	1179	18	1053	23	11.9	1034	24
7	0.38	0.01	0.7030	0.0253	0.0875	0.0021	0.7	541	15	541	13	0.0	541	13
8	0.22	0.01	1.4773	0.0440	0.1421	0.0034	0.8	921	18	857	19	7.5	849	20
9	0.38	0.01	0.4889	0.0213	0.0634	0.0016	0.6	404	15	396	10	2.0	396	10
10	0.30	0.01	0.6843	0.0196	0.0856	0.0020	0.8	529	12	529	12	0.0	529	12
11	0.83	0.03	0.4746	0.0141	0.0628	0.0015	0.8	394	10	392	9	0.5	392	9
12	0.40	0.02	0.4988	0.0305	0.0642	0.0018	0.4	411	21	401	11	2.5	400	11
13	0.28	0.01	0.8272	0.0256	0.0983	0.0024	0.8	612	14	605	14	1.2	604	14
14	0.45	0.02	0.6987	0.0238	0.0859	0.0021	0.7	538	14	531	12	1.3	530	13
15	0.29	0.01	0.7027	0.0269	0.0861	0.0021	0.6	540	16	533	13	1.5	532	13
16	1.37	0.05	0.7038	0.0201	0.0864	0.0021	0.8	541	12	534	12	1.3	533	12
17	0.39	0.02	0.7011	0.0229	0.0876	0.0021	0.7	539	14	541	13	-0.4	542	13
18	0.41	0.02	0.7438	0.0272	0.0873	0.0021	0.7	565	16	540	13	4.6	537	13
19	0.87	0.03	0.6745	0.0209	0.0848	0.0020	0.8	524	13	525	12	-0.2	525	12
20	0.38	0.01	0.7163	0.0253	0.0858	0.0021	0.7	549	15	531	12	3.4	529	13
21*	0.07	0.00	0.4806	0.0145	0.0647	0.0015	0.8	399	10	404	9	-1.4	405	9
22**	0.46	0.02	0.5500	0.0200	0.0645	0.0016	0.7	445	13	403	10	10.5	399	10

Т а б л и ц а 2 (окончание)

Table 2 (end)

№ пр.	Th/U	±1σ	Изотопные отношения			Rho	Возраст, млн лет			D, %	207Pb-корр.		
			207Pb/235U	±1σ	206Pb/238U		±1σ	206Pb/238U	±1σ		206Pb/238U	±1σ	
23*	0.01	0.00	2.1937	0.0634	0.2075	0.0049	0.8	1179	20	1215	26	1221	28
24	0.43	0.02	0.7007	0.0275	0.0855	0.0021	0.6	539	16	529	13	528	13
25	0.29	0.01	2.1702	0.0649	0.2026	0.0048	0.8	1172	21	1189	26	1192	28
26	0.14	0.01	0.4734	0.0142	0.0645	0.0015	0.8	394	10	403	9	404	10
27	0.21	0.01	0.4507	0.0144	0.0590	0.0014	0.7	378	10	369	9	369	9
28	0.52	0.02	0.4394	0.0135	0.0591	0.0014	0.8	370	10	370	9	370	9
29**	0.98	0.04	0.7466	0.0163	0.0661	0.0013	0.9	566	9	413	8	399	8
30	0.55	0.02	0.7329	0.0179	0.0935	0.0019	0.8	558	10	576	11	578	11
31	0.48	0.02	0.5897	0.0165	0.0694	0.0014	0.7	471	11	433	9	429	9
32	0.43	0.02	0.8014	0.0240	0.0905	0.0019	0.7	598	14	559	11	555	11
33**	0.38	0.02	0.4857	0.0700	0.0635	0.0023	0.3	402	48	397	14	397	15
34	0.44	0.02	0.5013	0.0174	0.0644	0.0014	0.6	413	12	402	9	402	9
35	0.53	0.02	0.5028	0.0152	0.0643	0.0014	0.7	414	10	402	8	401	9
36	0.50	0.02	0.7189	0.0185	0.0917	0.0019	0.8	550	11	565	11	567	12
37	1.44	0.06	0.4685	0.0165	0.0635	0.0015	0.7	390	11	397	9	398	9
38	0.19	0.01	0.5243	0.0162	0.0650	0.0015	0.7	428	11	406	9	404	9
39	0.32	0.01	0.7437	0.0224	0.0907	0.0020	0.7	565	13	559	12	559	12
40**	0.46	0.02	0.6371	0.0375	0.0646	0.0018	0.5	501	23	403	11	395	11
41**	0.60	0.02	0.9477	0.0286	0.0966	0.0021	0.7	677	15	594	13	586	13
42	0.92	0.04	0.5264	0.0174	0.0665	0.0015	0.7	429	12	415	9	414	9
43	0.96	0.04	0.8131	0.0257	0.0941	0.0021	0.7	604	14	580	13	577	13
44	0.48	0.02	0.7471	0.0256	0.0901	0.0021	0.7	567	15	556	12	555	13

П р и м е ч а н и е. Rho – коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. D – дискордантность: $D=100 \times [\text{возраст} (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})/\text{возраст} (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. ^{207}Pb -корр – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст, скорректированный на обыкновенный свинец ^{207}Pb -методом; * – определения с аномально низким значением Th/U отношения; ** – определения с $D>10\%$ и с большой относительной погрешностью изотопных отношений. Полуширинным шрифтом выделены определения, по которым оценены средневзвешенные значения возрастов на рис. 5.

Note. Rho – correlation coefficient between errors in the estimated $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ and $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ isotopic ratios. D – discordance: $D=100 \times [(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) \text{ age} / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) \text{ age} - 1]$. ^{207}Pb -corr – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (common Pb-corrected on the basis of ^{207}Pb); * – estimations with $D>10\%$ and large relative errors of isotope ratios. Bold font – estimations with calculated mean weighted ages (see Fig. 5).

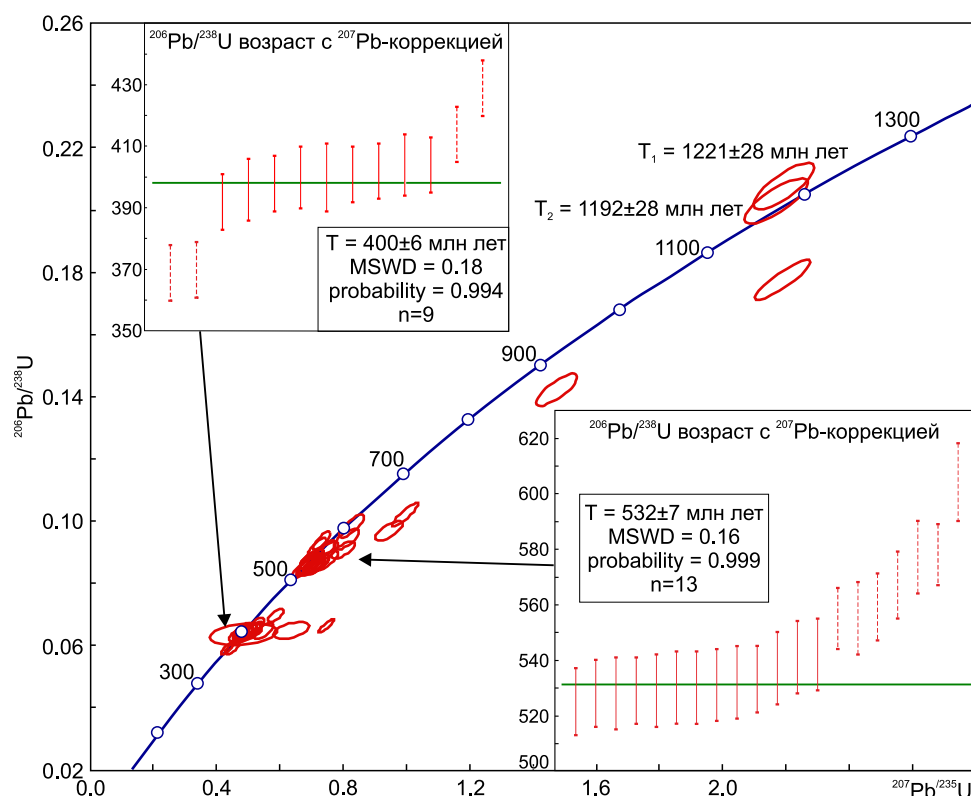


Рис. 5. U-Pb возраст цирконов из гранитов КГК на диаграмме Аренса-Везерилла с конкордией. Диаграммы средне-взвешенных $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрастов, скорректированных на обыкновенный свинец ^{207}Pb -методом, приведены в прямоугольниках внутри графика. Расчеты проведены по пробам с $D < 10\%$, а также не учтены определения, обозначенные пунктиром. Эллипсы погрешностей на уровне 1σ и планки погрешностей на уровне 2σ .

Fig. 5. The U-Pb ages of zircons from the Krutorechensky granites in the Arens-Weserill diagram with concordia. The diagrams of mean weighted $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages (common Pb-corrected based on ^{207}Pb) are shown in boxes inside the graph. Calculations for samples with $D < 10\%$. Values marked by the dotted line are excluded. Error ellipses at the 1σ level, and error bars at the 2σ level.

образовавшихся как в островодужной, так и в коллизионной обстановке, либо попадают на границу этих полей. По ряду других признаков (негативные относительно БСОХ аномалии Nb, Ti, Sr) граниты КГК близки к надсубдукционным образованиям, по другим особенностям (положительные аномалии K, Rb, Zr, Pb, Li, Th) – сходны с внутриплитными. Таким образом, поведение элементов-примесей не позволяет в данном случае четко выявить конкретную геодинамическую обстановку, в которой происходило образование пород КГК.

Такая двойственность геохимических черт характерна, например, для венд-кембрийских гранитоидов Южного Урала (юрминский комплекс в Башкирском мегантиклинории, битимский – в Уфалейском блоке) [Shardakova, 2016; Kholodnov et al., 2018], природа и связь их с Тиманским орогенезом пока не до конца ясны. С другой стороны, и большинство гранитов из северных массивов, упомянутых выше, для которых (по совокупности разных признаков) установлена надсубдукционная и/или коллизионная природа, также имеют неоднознач-

ные геохимические характеристики. Отметим, что более всего граниты КГК близки по содержаниям петрогенных и редких элементов к породам Велсовского массива (Ишеримский блок) (см. рис. 1), образование которого связывают [Petrov et al., 2014] с коллизионными процессами и формированием орогена тиманид. В.Н. Пучковым [Puchkov, 2018] отмечается, что подобное двойственное поведение микроэлементов в гранитах, вероятно, связано с влиянием плюма, вызывающего подплавление коры, в состав которой входят породы, сформировавшиеся в связи с процессами субдукции и/или коллизии.

От уральских гранитоидов других возрастных групп граниты КГК сильно отличаются по поведению РЗЭ. Например, по сравнению с распространенными собственно в уральском орогене надсубдукционными (карбон) и коллизионными (карбон – пермь) гранитами, породы КГК обладают более высоким уровнем концентраций РЗЭ и существенной отрицательной аномалией Eu. От среднерифейских рифтогенных гранитов Башкирского мегантикли-

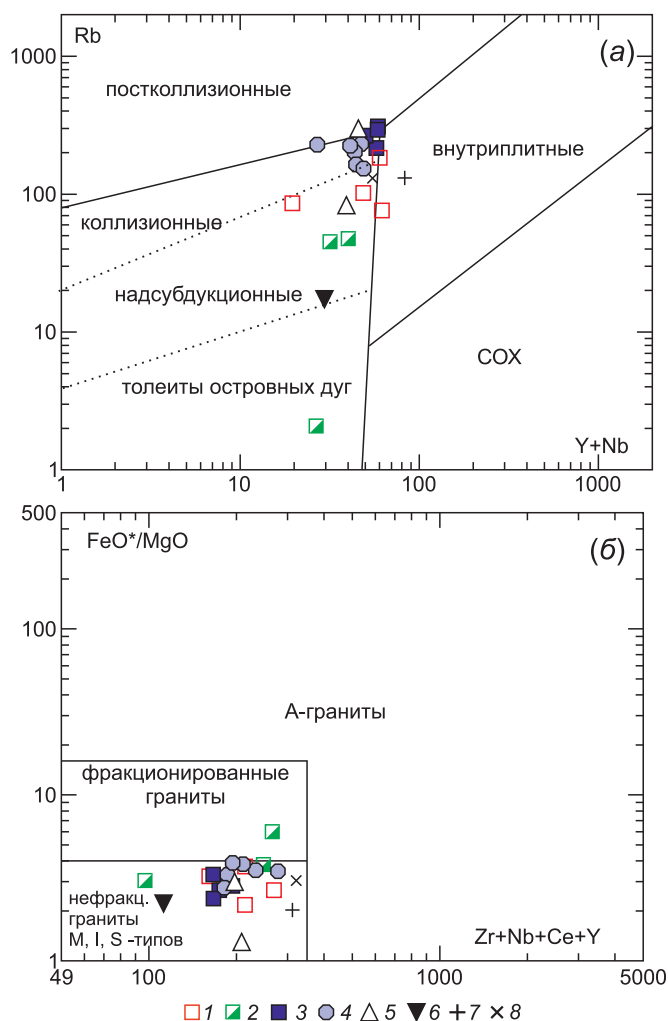


Рис. 6. Состав гранитоидов северной части Урала на диаграммах Rb–(Y+Nb) (а) и FeO*/MgO–(Zr+Nb+Ce+Y) (б). Основы диаграмм: (а) – по [Pearce et al., 1984], (б) – по [Whalen et al., 1987].

Ишеримский блок: 1 – Мойвинский, 2 – Посьмакский, 3 – Велсовский массив; 4 – крутореченский комплекс (Присалатимская зона). Ляпинский блок: 5 – Ыджидидягский, 6 – Торрепореизский, 7 – Ильяизский, 8 – Манхамбовский массив [Kuznetsov et al., 2006, 2007a; Udoratina et al., 2006; Petrov et al., 2014, 2015].

Fig. 6. Compositions of granitoids of the Northern Urals in diagrams Rb–(Y+Nb) (a) and FeO*/MgO–(Zr+Nb+Ce+Y) (b). Diagram (a) after [Pearce et al., 1984], diagram (b) after [Whalen et al., 1987].

Isherim block: 1 – Moiva, 2 – Posmak, 3 – Velsov massifs; 4 – Krutorechensky complex (Pri-Salatim zone). Lyapin block: 5 – Ydzhididlyag, 6 – Torreporeiz, 7 – Ilyaiz, 8 – Manhambov massifs [Kuznetsov et al., 2006, 2007; Udoratina et al., 2006; Petrov et al., 2014, 2015].

нория [Shardakova, 2016] граниты КГК заметно отличаются более низкими суммами РЗЭ и повышенными La/Yb-отношениями (см. рис. 3).

5.2. Возраст цирконов

Исследуемые цирконы из гранитов КГК полихронны и имеют сложную морфологию.

Отмечающиеся в некоторых зернах цирконов более древние ядра среднерифейского возраста, имеющие элементы собственного внутреннего строения и границы, не согласные с ориентировкой внешних зон, являются, вероятно, ксеногенными, унаследованными от пород субстрата. «Футляровидные» зоны вокруг древних ядер и самостоятельные зерна с осцилляционной зональностью с датировками 525–595 млн лет, скорее всего, имеют магматический генезис. Их СВЗ 537 ± 2 млн лет, соответствующий раннему кембрию (с учетом погрешности, очень близко к границе венда и кембрия), можно принимать за возраст кристаллизации гранитов КГК. Наличие молодых кайм с возрастом $369\text{--}429$ млн лет и СВЗ 400 ± 6 млн лет указывает на время проявления последних значимых

тектонотермальных событий, в которые был вовлечен блок гранитов КГК. Единичные значения возраста цирконов в интервале 849–604 млн лет могут быть интерпретированы следующим образом. Датировки 849 и 618 млн лет имеют значительную дискордантность (7.5 и 12.3 %, соответственно), что может быть вызвано значительной потерей радиогенного свинца в этом цирконе. Для расчетного возраста 604 млн лет составляет 1.2 %, что соответствует этой величине для большинства выполненных анализов и не указывает на высокую степень потери радиогенного свинца. Как вариант, этот циркон может быть также ксеногенным, заимствованным из субстрата.

Неоднородное внутреннее строение, наличие нескольких возрастных популяций цирконов отражают сложную историю кристаллизации и преобразования пород КГК.

5.3. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГРАНИТОИДОВ

Непосредственно в строении зоны ГУР гранитоиды данного (537 млн лет) возрастного уровня

установлены впервые. Полученная датировка позволяет сопоставлять граниты КГК с рядом почти одновозрастных образований, локализованных к западу от зоны ГУР. Гранитоиды венд-кембрийского возраста распространены в этой протяженной области неравномерно. Их массивы выведены на поверхность на Полярном, Приполярном и Северном Урале в Центрально-Уральской мегазоне, а также вскрыты скважинами в фундаменте прилегающей к Уралу с запада Печорской синеклизы. Формирование гранитов такого возраста, по мнению [Kuznetsov et al., 2006; Udoratina et al., 2006; Soboleva et al., 2012; Petrov et al., 2014, 2015; и др.], происходило в надсубдукционной, коллизионной и постколлизионной обстановках.

В частности установлено, что в пределах Ишеримского блока, ограничивающего Присалатимскую зону с запада, гранитоиды внедрялись двухэтапно: в венде – в надсубдукционной (Мойвинский и Посьмакский массивы, 560 млн лет) и в раннем кембрии – в коллизионной (Велсовский массив, 530 млн лет) обстановке [Maslov et al., 2018; Petrov et al., 2015]. По представлениям авторов карты (см. рис. 2), восточная часть этого блока входит в Присалатимскую зону. Однако, ввиду сложного блокового строения территории, разнообразия свит и отсутствия ряда датировок по ним, вопрос о западной границе этой части зоны ГУР, по нашему мнению, остается открытым.

В Ляпинском блоке Г.А. Петровым [Petrov et al., 2014] также выделяются два магматических импульса: вендский (известково-щелочные гранитоиды I-типа, Торрепореизский и Ыджидлягский массивы) и поздневендско-раннекембрийский (граниты А-типа, Маньхамбовский и Ильяизский массивы). «Первый из них отвечает формированию коллизионного орогена, второй фиксирует его коллапс» [Petrov et al., 2014].

Как было указано выше, венд-кембрийские гранитоиды присутствуют и в более южных частях зоны сочленения Уральского подвижного пояса с ВЕК, например в Уфалейском блоке (битимский комплекс) и Башкирском мегантиклинории (юрминский комплекс) [Shardakova, 2016; и др.]. Вероятно, они были сформированы в результате повторных тектонических движений (по времени синхронных с Тиманским орогенезом) по ранее существующим рифтовым разломам. Не исключается также участие в их генезисе вещества и энергии мантийного плюма. На юге, в пределах Эбетинской антиформы, описаны граниты с «надсубдукционной» геохимией, которые связываются [Puchkov, 2010; Samygin et al., 2010] с существованием вендской конвергентной окраины.

Полученный нами возраст гранитов КГК (537±2 млн лет) наряду с выявленными особенностями

химического состава подтверждает их сходство с венд-кембрийскими гранитоидами Ишеримского и Ляпинского блоков, сформированных в обстановке сжатия на завершающем этапе Тиманской коллизии [Puchkov, 2010; Petrov et al., 2014, 2015].

Морфология, особенности внутреннего строения цирконов КГК и полученные по ним разновозрастные датировки отражают сложную историю преобразования гранитов в зоне смятия. Протолитом гранитоидов КГК, вероятно, могли являться лежащие в основании Присалатимской зоны высокоглиноземистые низкокальциевые метаосадочные породы фундамента ВЕП. Это обусловило пералюминиевый состав гранитов КГК, «коровые» отношения изотопов Sr и Nd и наличие древних ядер в цирконах (1034–1221 млн лет). Эти средне-рифейские датировки реликтовых цирконов, заимствованных из протолита, можно рассматривать как свидетельство того, что в Присалатимской зоне присутствуют комплексы, принадлежавшие ВЕП и вовлеченные в тектонические деформации при формировании зоны ГУР.

Как вариант, граниты КГК могли быть отторгнуты от Ишеримского блока, где имеются, как мы показали выше, породы близкого состава и возраста, т.е., как и Ишеримский блок [Petrov et al., 2014, 2015], фрагмент, к которому приурочен КГК, может являться частью Тиманского орогена, геодинамический сценарий образования и распада которого подробно описан в работах [Kuznetsov et al., 2006, 2007a, 2007b, 2014]. По мнению этих авторов, в северо-восточной части ВЕП ее кратонический остов приращен тиманидами (печорская часть Тимано-Печерско-Южнобаренцевоморской эпитиманской платформы – молодой платформы с тиманским фундаментом и позднекембрийско-кайнозойским чехлом), поэтому на значительной части Северного Урала и на Полярном Урале ГУР – это зона, ограничивающая с востока не ВЕП, а область «тиманид». Данное положение спорно: по мнению авторов, ВЕП включает в себя не только эпипалеозойско-архейский кратон, но и, в частности, Тимано-Печорскую эпитиманскую плиту.

Из силурийских андезитов, входящих в магматические комплексы ордовикско-девонской Тагильской палеоостровной дуги, находящейся восточнее, были выделены рифейские цирконы двух генераций, датированных Pb-Pb методом: 990–1100 и 1450–1660 млн лет [Puchkov et al., 2006]. Исходя из геохимических характеристик вулканитов (в частности, говорящих о ничтожной контаминации древним сиалическим веществом), авторы высказали предположение, что древние компоненты в вулканитах и осадках изученного разреза являются результатом контаминации расплава базитовым веществом мантии на пути этого расплава от

зоны его образования к земной поверхности. Не так давно на Полярном Урале к востоку от ГУР в вулканогенно-осадочных толщах Малоуральской зоны зафиксировано большое количество рифейских и раннедокембрийских цирконов (2700–3000, 1000–2200 и 547–763 млн лет) [Sobolev et al., 2017], что, по мнению этих авторов, «...свидетельствует о наличии докембрийского фундамента в основании палеозойской островодужной системы Полярного Урала». Как было указано выше, такое объяснение появления древних цирконов в палеозойских островодужных комплексах – не безальтернативное. Могут быть еще и другие варианты; например, древние цирконы могли попасть в осадки океанической впадины в результате сноса с континента, а затем и в осадки островной дуги при перемычке аккреционной призмы. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Датировки около 400 млн лет для ряда цирконов из гранитов КГК, вероятно, отражают время преобразования U-Pb изотопной системы в результате последующей тектонической активности, природа которой не вполне ясна. Как показано [Puchkov, 2010], Тагильская дуга столкнулась с пассивной окраиной континента только в конце девона – начале карбона. Это событие не могло привести к омоложению цирконов, некоторые из которых имеют внешние молодые каймы (см. рис. 4). В девонское же время восточная периферия ВЕП и ограничивающих ее с северо-востока областей тиманид была вовлечена в плюмовые события [Puchkov et al., 2016], и девонские датировки могут быть отражением плюмового термально-флюидного события в это время.

На основании материала, изложенного выше, мы считаем, что по составу и возрасту граниты КГК наиболее близко сопоставимы с венд-кембрийскими гранитами Северного и Приполярного Урала и так же, как последние, образовались в результате конвергентных геодинамических процессов (коллизии?) при формировании орогена тиманид [Udoratina et al., 2006; Zhdanov, 2009; Petrov et al., 2014, 2015; и др.]. В более позднее время граниты КГК были вовлечены в деформации, сопровождавшие образование ГУР при аккреционно-коллизионных событиях, которые привели к формированию Уральского орогена. По мнению В.Н. Пучкова, в венде – кембрии в этой области действовал мантийный плюм (так называемый «маньхамбовский», термин автора [Puchkov, 2018]), обеспечивающий энергией и флюидной фазой активное течение тектонотермальных событий. Под влиянием этого фактора граниты могли приобрести геохимические особенности, характерные как для надсубдукционных, так и для внутриплитных образований.

Следует отметить, что в Присалатимской зоне в метатерригенных породах фаунистически охарактеризованной саранхапнерской свиты ($\text{Є}_3\text{-O}_1$ sr, см. рис. 1) присутствуют детритовые цирконы с протерозойскими и ранне- и среднекембрийскими, в том числе и «крутореченскими», датировками [Maslov et al., 2018]. Этот факт указывает на то, что во время формирования саранхапнерской свиты граниты КГК могли быть уже выведены на уровень эрозионного среза. Нахождение блоков гранитов КГК (V-Є_1) в зоне тектонического скупивания образований саранхапнерской (Є-O_1) и хомасьинской (O_{1-2}) свит свидетельствует о сложной меланжевой природе Присалатимской зоны.

Проявление на границе венда и кембрия гранитоидов разных геохимических типов (см. выше), указывающих на смену геодинамических обстановок, свидетельствует о сложности строения рассматриваемой зоны и относительной краткосрочности и нестабильности проявлений тектономагматических событий вдоль восточной окраины ВЕП в данном возрастном интервале.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые установлено, что в составе фрагментов, слагающих зону ГУР, присутствуют граниты (венд)раннекембрийского возраста (крутореченский комплекс). Наличие таких относительно древних пород среди более молодых метатерригенно-вулканогенных образований (саранхапнерской и хомасьинской свит) подтверждает их тектоническое совмещение и меланжевую природу Присалатимской части зоны ГУР. Наблюдаемое сходство гранитов КГК с гранитоидами западного склона Северного и Приполярного Урала (Ляпинский и Ишеримский блоки) по возрасту и петрогеохимическим особенностям указывает на связь с коллизионными процессами завершающего этапа формирования Тиманского орогена. Вероятно участие в их генезисе мантийного плюма. Его влияние, а также краткосрочность и быстрая смена тектономагматических событий вдоль восточной окраины ВЕП в данном возрастном интервале могли стать причиной того, что гранитам КГК присущи геохимические черты как надсубдукционных, так и внутриплитных образований. Среднерифейский возраст реликтовых цирконов, существенная доля корового компонента в протолите гранитов КГК указывают на то, что блок рассматриваемых пород, расположенный западнее ГУР, мог изначально принадлежать к восточной окраине ВЕП.

Полученные данные используются при составлении геологических карт и металлогенических оценок для северных сегментов Урала.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко благодарны безвременно ушедшей из жизни С.И. Нестеровой (ИГГ УрО РАН) за неоценимую помощь при обработке проб и выделе-

нии монофракций минералов. Работа выполнена в рамках фундаментальных исследований ИГГ УрО РАН (№ гос. рег. АААА-А18-118052590029-6) и ГИН СО РАН (базовый проект IX.129.1.2., № гос. рег. АААА-А16-116122110027-2).

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Buyantuev M.D., Khubanov V.B., Vrublevskaya T.T., 2017. U-Pb LA-ICP-MS dating of zircons from subvolcanics of the bimodal dyke series of the Western Transbaikalia: Technique, and evidence of the Late Paleozoic extension of the crust. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (2), 369–384 (in Russian) [Буянтуев М.Д., Хубанов В.Б., Врублевская Т.Т. U-Pb LA-ICP-MS датирование цирконов из субвулканитов бимодальной дайковой серии Западного Забайкалья: методика, свидетельства позднепалеозойского растяжения земной коры // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 2. С. 369–384]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0246>.
- Dovzhikova E.G., Remizov D.N., Piis V.L., 2000. Geodynamic position of igneous rocks of the Pechora plate basement according to new data. In: Materials of the II All-Russia Petrographic Meeting. V. IV. Syktyvkar, p. 49–52 (in Russian) [Довжицова Е.Г., Ремизов Д.Н., Пиис В.Л. Геодинамическая позиция магматических пород фундамента Печорской плиты в свете новых данных // Материалы II Всероссийского петрографического совещания. Т. IV. Сыктывкар, 2000. С. 49–52].
- Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A., 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology* 211 (1–2), 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>.
- Kholodnov V.V., Shardakova G.Yu., Fershtater G.B., Shagalov E.S., 2018. The Riphean magmatism preceding the opening of Uralian paleocean: geochemistry, isotopes, age, and geodynamic implications. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (2), 365–389. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0351>.
- Khubanov V.B., Buyantuev M.D., Tsygankov A.A., 2016. U-Pb dating of zircons from PZ3–MZ igneous complexes of Transbaikalia by sector-field mass spectrometry with laser sampling: technique and comparison with SHRIMP. *Russian Geology and Geophysics* 57 (1), 190–205. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.013>.
- Korovko A.V., Borodina N.S., Vishnyakova M.D., Desyatnichenko L.I., Shardakova G.Yu., 2017. Geological, petrographic and geochemical features of granites of the Krutorechensky complex (Prisalatim zone, Northern Urals). In: Yearbook-2016. Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS. Vol. 164. IGG UB RAS, Yekaterinburg, p. 120–124 (in Russian) [Коровко А.В., Бородина Н.С., Вишнякова М.Д., Десятниченко Л.И., Шардакова Г.Ю. Геолого-петрографические и геохимические особенности гранитов крутореченского комплекса (Присалатимская зона, Северный Урал) // Ежегодник-2016. Труды Института геологии и геохимии УрО РАН. Вып 164. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. С. 120–124].
- Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Alekseev A.S., Romanyuk T.V., 2014. New data on detrital zircons from the sandstones of the lower Cambrian Brusov Formation (White Sea region, East-European craton): Unravelling the timing of the onset of the Arctida–Baltica collision. *International Geology Review* 56 (16), 1945–1963. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.977968>.
- Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Gertseva M.V., Andreichev V.L., Dorokhov N.S., 2006. Pre-Uralian tectonic evolution of the north-east and east frame of the East European craton. Part 1. Pre-Uralides, Timanides and Pre-Ordovician granitoid volcano-plutonic associations of the North Urals and Timan-Pechora region. *Litosfera (Lithosphere)* (4), 3–22 (in Russian) [Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О.В., Герцева М.В., Андреичев В.Л., Дорохов Н.С. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Часть 1. Протоуралиды, тиманиды и доордовикские гранитоидные вулканоплутонические ассоциации севера Урала и Тимано-Печорского региона // *Литосфера*. 2006. № 4. С. 3–22].
- Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Gertseva M.V., Andreichev V.L., Dorokhov N.S., 2007a. Pre-Uralian tectonic evolution of the north-east and east frame of the East European craton. Part 1. Neo-Proterozoic–Cambrian Baltica–Arctida Collision. *Litosfera (Lithosphere)* (1), 32–45 (in Russian) [Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О.В., Герцева М.В., Андреичев В.Л., Дорохов Н.С. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Часть 2. Позднедокембрийско-кембрийская коллизия Балтики и Арктиды // *Литосфера*. 2007. № 1. С. 32–45].
- Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Hertseva M.V., Andreichev V.L., 2007b. Pre-Ordovician tectonic evolution and volcano-plutonic associations of the Timanides and northern Pre-Uralides, northeast part of the East European craton. *Gondwana Research* 12 (3), 305–323. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.021>.
- Maslov A.V., Petrov G.A., Ronkin Y.L., 2018. Early stages of the evolution of uralides as evidenced from the U-Pb Systematics of detrital zircons from rift complexes. *Stratigraphy and Geological Correlation* 26 (2), 121–138. <https://doi.org/10.1134/S0869593818020065>.
- Pearce J.A., Harris N.B., Tindle A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25 (4), 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>.

- Pearce J.A., Norry M.J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69 (1), 33–47. <https://doi.org/10.1007/BF00375192>.
- Petrov G.A., Ronkin Y.L., Gerdes A., Maslov A.V., 2015. First results of U–Pb dating of detrital zircons from metasandstones of the Isherim anticlinorium (North Urals). *Doklady Earth Sciences* 464 (2), 1010–1014. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15100165>.
- Petrov G.A., Ronkin Y.L., Tristan N.I., Gerdes A., Maslov A.V., 2014. New data on composition and age of granites from the Isherim anticlinorium and boundary of the Timanides in the North Urals. *Doklady Earth Sciences* 459 (2), 1514–1518. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14120290>.
- Puchkov V.N., 2010. Geology of the Urals and Cisurals (Topical Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny). Dauria Publishing House, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: Даурия, 2010. 280 с.].
- Puchkov V.N., 2018. The plume-dependent granite-rhyolite magmatism. *Litosfera (Lithosphere)* 18 (5), 692–705 (in Russian) [Пучков В.Н. Плуем-зависимый гранит-риолитовый магматизм // Литосфера. 2018. Т. 18. № 5. С. 692–705]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-692-705>.
- Puchkov V., Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Sergeeva N., 2016. A Devonian >2000-km-long dolerite dyke swarm-belt and associated basalts along the Urals-Novozemelian fold-belt: part of an East-European (Baltica) LIP tracing the Tuzo Superswell. *GFF* 138 (1), 6–16. <https://doi.org/10.1080/11035897.2015.1118406>.
- Puchkov V.N., Rosen O.M., Zhuravlev D.Z., Bibikova E.V., 2006. Contamination of Silurian volcanic rocks in the Tagil synform by Precambrian zircon. *Doklady Earth Sciences* 411 (2), 1381–1384. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06090108>.
- Rudnick R.L., Gao S., 2003. Composition of the continental crust. In: R.L. Rudnick (Ed.), *Treatise on geochemistry*. Vol. 3. Elsevier, Amsterdam, p. 1–64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>.
- Samygin S.G., Belova A.A., Ryazantsev A.V., Fedotova A.A., 2010. Fragments of the Vendian convergent borderland in the South Urals. *Doklady Earth Sciences* 432 (2), 726–731. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10060036>.
- Shand S.J., 1943. *The Eruptive Rocks*. John Wiley, New York, 444 p.
- Shardakova G.Y., 2016. Geochemistry and isotopic ages of granitoids of the Bashkirian Mega-Anticlinorium: Evidence for several pulses of tectono-magmatic activity at the junction zone between the Uralian orogen and East European platform. *Geochemistry International* 54 (7), 594–608. <https://doi.org/10.1134/S0016702916070089>.
- Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse M.J., 2008. Plešovice zircon – A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology* 249 (1–2), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>.
- Sobolev I.D., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Kaneva T.A., Kulikova K.V., Vikentiev I.V., Khubanov V.B., Buyantuev M.D., Hourigan J.K., 2017. First results of U–Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from Paleozoic island arc clastic rocks of Polar Urals. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological section* 92 (4), 3–26 (in Russian) [Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоратина О.В., Канева Т.А., Куликова К.В., Викентьев И.В., Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Хоуриган Дж.К. Первые результаты U–Pb (LA-ICP-MS) датирования детритовых цирконов из палеозойских островодужных обломочных пород Полярного Урала // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2017. Т. 92. Вып. 4. С. 3–26].
- Soboleva A.A., Karchevskii A.F., Efanova L.I., Kuznetsov N.B., Grove M., Sobolev I.D., Maurin M.V., 2012. Evidence for Late Riphean granite formation in the Polar Urals. *Doklady Earth Sciences* 442 (2), 181–187. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12020080>.
- State Geological Map, 2006. Scale 1:200000. Sheet P-40-XXXVI. VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Государственная геологическая карта. Масштаб 1:200000. Лист P-40-XXXVI. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006].
- Sun S.S., 1982. Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46 (2), 179–192. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90245-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90245-9).
- Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders, M.J. Norry (Eds.), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 42, p. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.
- Udoratina O.V., Soboleva A.A., Kuzenkov N.A., Rodionov N.V., Presnyakov S.L., 2006. Age of granitoids in the Man'khambo and Il'yaiz plutons, the northern Urals: U–Pb data. *Doklady Earth Sciences* 407 (1), 284–289. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06020309>.
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 95 (4), 407–419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>.
- Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., van Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W., 1995. Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter* 19 (1), 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>.
- Zhdanov A.V., 2009. Legend of the Ural Series of Sheets of State Geological Map-1000/3 (Updated Version). VSEGEI, Saint Petersburg, 380 p. (in Russian) [Жданов А.В. Легенда Уральской серии листов Госгеолкарты-1000/3 (актуализированная версия). СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 380 с.].


СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT AUTHORS

Анатолий Васильевич Коровко

канд. геол.-мин. наук, с.н.с.

Институт геологии и геохимии
им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН
620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

e-mail: Korovko@igg.uran.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8020-0904>

Anatoly V. Korovko

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher


A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS
15 Akademik Vonsovsky street, Yekaterinburg 620016, Russia

Галина Юрьевна Шардакова

канд. геол.-мин. наук, в.н.с.

Институт геологии и геохимии
им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН
620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

✉ e-mail: shardakova@igg.uran.ru; shardakovagalina@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0587-8416>

Galina Yu. Shardakova

Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Researcher


A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS
15 Akademik Vonsovsky street, Yekaterinburg 620016, Russia

Виктор Николаевич Пучков

докт. геол.-мин. наук, член-корреспондент РАН, г.н.с.

Институт геологии и геохимии
им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН
620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

e-mail: puchkv@ufaras.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8644-0132>

Victor N. Puchkov

Doctor of Geology and Mineralogy, Corresponding Member of RAS,
Chief Researcher

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS
15 Akademik Vonsovsky street, Yekaterinburg 620016, Russia

Валентин Борисович Хубанов

канд. геол.-мин. наук, с.н.с.

Геологический институт СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия

Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова
670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, Россия

e-mail: khubanov@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5237-6614>

Valentin B. Khubanov

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Geological Institute, Siberian Branch of RAS
6a Sakhyanova street, Ulan-Ude 670047, Russia

D. Banzarov Buryat State University
24a Smolin street, Ulan-Ude 670000, Russia