

УДК 550.42, 551.24

DOI: 10.24930/1681-9004-2025-25-4-819-847

Геохимия и возраст детритового циркона из четвертичных отложений Уфалейского блока (Средний Урал): источники сноса и проблема докембрия

Г. Ю. Шардакова, Е. В. Пушкарев, А. О. Симанкова, В. С. Червяковский,
М. В. Червяковская

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: shardakova@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 20.02.2025 г., принята к печати 11.04.2025 г.

Объект исследования. Детритовые цирконы из четвертичных отложений в обрамлении пироксенитов, слагающих Шигирские сопки в западной части Уфалейского блока. *Цель.* Верификация докембрийского возраста, оценка типа субстрата и возможных геотектонических условий формирования пород, вмещающих ультрамафиты. *Материалы и методы.* U-Pb изотопное датирование и определение концентраций редких и редкоземельных элементов в детритовом цирконе методом лазерной абляции, микрорентгеноспектральный анализ состава минералов, оценка природы и состава источников сноса и дальности переноса детритового циркона. *Результаты.* Установлено преобладание датировок детритового циркона, соответствующих палеопротерозою (2100–2000 млн лет), при небольшой роли архейских и неопротерозойско-нижнеордовикских датировок. Цирконы произошли из источников континентального типа, отвечающих магматическим и метаморфическим породам основного, среднего и кислого состава. Дальность переноса была незначительной. *Выводы.* Анализ морфологии циркона, его внутреннего строения, типов включений, геохимии и возраста позволяет предположить сходство состава протолита и единую докембрийскую историю развития западной части Уфалейского блока и образований, слагающих Тараташский и Александровский блоки, представляющие собой фрагменты кристаллических комплексов архейского протократона Волго-Уралья. Это заключение также подтверждается сходством составов древних высокоизвестковистых ультраосновных и основных пород изученных блоков.

Ключевые слова: детритовый циркон, состав протолита, источники сноса, изотопное датирование, геохимия, протерозой, континентальная кора, ультрамафиты, базиты, Уфалейский блок, Урал

Источник финансирования

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, грант № 23-17-00224. <https://rscf.ru/project/23-17-00224>

Geochemistry and age of detrital zircon from the Quaternary deposits from the Ufaley block (Middle Urals): provenance and the problem of Precambrian

Galina Y. Shardakova, Evgenii V. Pushkarev, Aleksandra O. Simankova,
Vasily S. Chervyakovsky, Maria V. Chervyakovskaya

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: shardakova@igg.uran.ru

Received 20.02.2025, accepted 11.04.2025

Research subject. Detrital zircons from the Quaternary deposits from the frame of pyroxenite composing the Shigirsky hills in the western part of the Ufaley block. *Aim.* The verification of the Pre-Cambrian dating, evaluation of the substrate type and geotectonic settings of rocks enclosing ultramafites of the Ufaley block. *Materials and methods.* U-Pb isotope dating and determination of rare and rare-earth elements in detrital zircon by laser ablation, RSMA investigation of minerals,

Для цитирования: Шардакова Г.Ю., Пушкарев Е.В., Симанкова А.О., Червяковский В.С., Червяковская М.В. (2025) Геохимия и возраст детритового циркона из четвертичных отложений Уфалейского блока (Средний Урал): источники сноса и проблема докембрия. *Литосфера*, 25(4), 819–847. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-819-847>. EDN: TXPUTT

For citation: Shardakova G.Y., Pushkarev E.V., Simankova A.O., Chervyakovsky V.S., Chervyakovskaya M.V. (2025) Geochemistry and age of detrital zircon from the Quaternary deposits from the Ufaley block (Middle Urals): provenance and the problem of Precambrian. *Lithosphere (Russia)*, 25(4), 819–847. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-819-847>. EDN: TXPUTT

© Г.Ю. Шардакова, Е.В. Пушкарев, А.О. Симанкова, В.С. Червяковский, М.В. Червяковская, 2025

establishing of zircon nature and provenance and the distance of zircon migration. *Results.* Dominant Paleoproterozoic (2100–2000 Ma) maximum for the distribution of detrital zircon age accompanied by lower picks of the Archean and Neoproterozoic-Lower Ordovician age has been established. Detrital zircon was derived from continental-type sources corresponding to igneous and metamorphic rocks of basic, intermediate and acidic composition. The transfer distance was negligible. *Conclusions.* Zircon morphology, its internal structure, mineral inclusions, geochemistry and age allow to suggest the similar protolith and joint the Precambrian evolution at least the western part of the Ufaley block and Taratash and Alexandrovsky blocks, which are the fragments of crystalline complexes of the Archean Volga-Uraliya craton. This conclusion supports additionally by similarity in composition of high-Ca mafic-ultramafic rocks known in these blocks.

Keywords: detrital zircon, protolith, provenance, isotope dating, geochemistry, Proterozoic, continental crust, ultramafic and basic rocks, the Ufaley block, Urals

Funding information

This work was conducted with financial support from the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 23-17-00224. <https://rscf.ru/project/23-17-00224>

ВВЕДЕНИЕ

Циркон является одним из наиболее распространенных акцессорных минералов в магматических и метаморфических горных породах континентальной коры (Hoskin, Schaltegger, 2003; Григорьев, 2005; Scherer et al., 2007; Каулина, 2010). Обладая высокой устойчивостью к химическим воздействиям и абразивному истиранию, умеренным удельным весом (около 4.6–4.7 г/см³), циркон под действием различных экзогенных геологических процессов может переноситься на большие расстояния вместе с дезинтегрированным материалом горных пород. При этом он хорошо сохраняет память о времени формирования и вещественных особенностях материнских образований, что делает детритовый циркон важным индикатором для установления источников сноса, природы и возраста эродированных комплексов. Современные локальные методы определения изотопного U-Pb возраста и концентраций редких элементов в минералах позволили вывести изучение детритового циркона на новый уровень, сделав его важнейшим инструментом при изучении истории геологического развития крупных геологических структур и террейнов (Harley, Kelly, 2007; Szczyński et al., 2020; Wilde et al., 2021; Schwartz et al., 2021; Romanyuk et al., 2024; Hu et al., 2024).

Часто в областях аккреции, приуроченных к границам структур с разным типом коры, тектонически совмещены блоки горных пород разного состава, возраста и природы, что делает их изучение весьма затруднительным. Примером такой зоны является область сочленения Уральского подвижного пояса (УПП) и Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Так, вдоль западной границы УПП залегают несколько блоков, в строении которых важную роль играют докембрийские породы, с севера на юг: Ляпинский (Кожимский + Маньхамбовский), Ишеримский, Кваркушско-Камен-

ногорский, Уфалейский, Башкирский, Уралтауский (Маслов и др., 2004; Петров и др., 2005; Кузнецов и др., 2005; Пучков, 2010; Nosova et al., 2012; Петров и др., 2015; Шардакова, 2016a). Среди образований, представляющих эти структуры, самые древние датировки зафиксированы в Тараташском блоке (ТБ), сложенном метаморфическими и ортомагматическими породами одноименного комплекса. Древнейшие определения возраста для гранулитов лежат в интервале 3504–2900 млн лет, модельный Nd-возраст их протолита оценивается как 3500–3645 млн лет (Синдерн и др., 2006; Ронкин и др., 2012). Породы ТБ в интервале 2100–2000 млн лет испытали интенсивные метаморфизм и мигматизацию (Тевелев и др., 2015; Сомсикова и др., 2022). Метаморфические события в это время имели место и в Александровском блоке (Пыстин и др., 2012). В Уфалейском блоке (УБ), ультраосновные породы западной части которого являются предметом нашего исследования, докембрийский возраст эдуктов метаморфических пород предполагается только на основании высокой степени их метаморфизма, деформированности и данных о верхне-неопротерозойско-кембрийском возрасте секущих их гранитоидов (Шардакова, Червяковская, 2020). В пользу представлений о докембрийском возрасте комплексов УБ может свидетельствовать протерозойский возраст циркона, извлеченного из клинопироксенитов Шигирских сопок (ШС), залегающих среди амфиболитов и гнейсов, несмотря на отсутствие данных о геологических взаимоотношениях метаморфических пород и ультрамафитов (Краснобаев и др., 2013). Большинство опубликованных изотопно-геохронологических данных по возрасту метаморфитов и гранитоидов УБ укладывается в интервал от кембрия до верхнего палеозоя (Коротеев и др., 2009; Краснобаев и др., 2010; Белковский, 2011; Шардакова, 2016b). Проведенное нами изучение детритового циркона из четвертичных элювиально-делювиальных отложений за-

падного сектора УБ показывает высокую вероятность существования здесь пород протерозойского и архейского возраста. Эти результаты позволяют с большей уверенностью проводить геологическую корреляцию между метаморфическими и ультраосновными магматическими породами Уфалейского и Тараташского и Александровского блоков, расположенных западнее.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ УФАЛЕЙСКОГО БЛОКА И ПРОБЛЕМЫ ГЕОХРОНОЛОГИИ

Уфалейский блок, который является южной частью одноименного антиклинория, расположен в пределах аккреционной зоны между палеозойскими структурами УПП и докембрийскими комплексами восточной окраины ВЕП. С востока блок ограничен зоной Главного Уральского разлома (рис. 1а), с запада – Уфимским разломом. На западе через узкую полосу Таганайско-Иремельского синклинория УБ граничит с Тараташским блоком (Государственная..., 2021), метаморфические образования которого здесь интенсивно деформированы и превращены в бластомилониты.

В середине XX в. считалось, что УБ представляет собой гранитогнейсовый купол, вокруг которого проявлен зональный метаморфизм (Кейльман, 1974). Дальнейшие исследования показали, что УБ состоит из нескольких пластин, разделенных зонами бластомилонитов, развитых вдоль тектонических контактов, не выходящих за его пределы, что характерно для дорифейских комплексов Урала (Русин, Краснобаев, 1984; Белковский, 1987, 2011; Echtler et al., 1997; Краснобаев и др., 2010). Представления о купольной структуре блока сейчас имеют лишь историческую ценность.

Большая часть площади УБ сложена гнейсами и амфиболитами, подразделенными в ходе геологической съемки на две свиты – егустинскую в западной части и слюдяногорскую в центральной части блока (рис. 1б). По данным (Государственная..., 2021), слюдяногорская свита характеризуется значительно большей долей сиалических пород по сравнению с егустинской свитой, где высока доля амфиболитов. Для обеих свит предполагается протерозойский возраст протолита. С востока они обрамлены полосой метаморфических пород куртинской свиты, протягивающейся далеко на север Уфалейского антиклинория (Государственная..., 2021). Куртинская свита представлена преимущественно гранат-слюдяно-кварцевыми сланцами и высокобарическими бластомилонитами с линзами и будинами эклогитов, апоэклогитовых амфиболитов, гранатовых пироксенитов и антигоритовых серпентинитов (Белковский, 2011). Предполагается, что возраст протолита пород куртинской свиты мог быть докембрийским (Краснобаев и др., 2010;

Белковский, 2011; Государственная..., 2021), хотя никаких доказательств этого до сих пор не получено. Породы этой свиты с востока перекрыты образованиями зоны Главного Уральского разлома. Последняя “запечатана” гранитными интрузиями каменноугольного возраста (Hetzl, Romer, 1999), а заключительные фазы тектонической активности в ней проявлены в позднепермско-раннетриасовое время (Hetzl, Glodny, 2002).

Предположение о докембрийском возрасте протолита метаморфических пород УБ до сих пор основывается на косвенных данных. В первую очередь это высокий уровень метаморфизма, достигающий верхов амфиболитовой фации, с явлениями гранитного анатексиса и интенсивные деформации пород. Опубликованные более 60 лет назад данные о протерозойском возрасте иттроэпидота (1470 и 1200 млн лет) из пегматитовой жилы, секущей слюдяные сланцы куртинской свиты (Минеев, 1959; Овчинников и др., 1964), не нашли своего подтверждения. Более поздние исследования этого иттроэпидота совместно с монофракциями полевых шпатов, слюд и валового состава породы Sm-Nd методом позволило оценить эохронное значение возраста на уровне 525 млн лет (Государственная..., 2021). В работе А.А. Краснобаева с соавторами (1998) без приведения цифровых аналитических данных опубликованы датировки циркона 1100–1200 млн лет из пород УБ. Впоследствии эти данные не были никем верифицированы.

В качестве косвенного свидетельства древнего возраста метабазитов центральной части УБ можно рассматривать возраст 579 млн лет гранитоидов битимского комплекса, секущих амфиболиты (Шардакова, Червяковская, 2020). Единственным на сегодняшний день свидетельством палеопротерозойского возраста пород, входящих в контур УБ, является U-Pb возраст циркона 1651 и 1444 млн лет, выделенного из клинопироксенитов западной части блока (Краснобаев и др., 2013). Последние образуют субмеридионально вытянутое тело протяженностью около 4 км при видимой мощности до 0.5 км, залегающее среди полосчатой гнейсово-амфиболитовой толщи егустинской свиты, падающей на восток. Тело пироксенитов разбито на два блока субширотной долиной и в рельефе выражено Северной и Южной Шигирскими сопками. По составу ультрамафиты близки к клинопироксенитам из дунит-клинопироксенит-габбровых комплексов Урало-Аляскинского типа, исходным расплавом для которых могли служить анкармиты с отношением $CaO/Al_2O_3 > 1$, указывающим на верлитовый состав мантийного источника (Пушкарев и др., 2018). На сходство клинопироксенитов ШС с анкармитами, а также с израндитами в составе Александровского блока, расположенного юго-западнее, указывали ранее А.М. Пыстин с соавторами (1976, 2012;

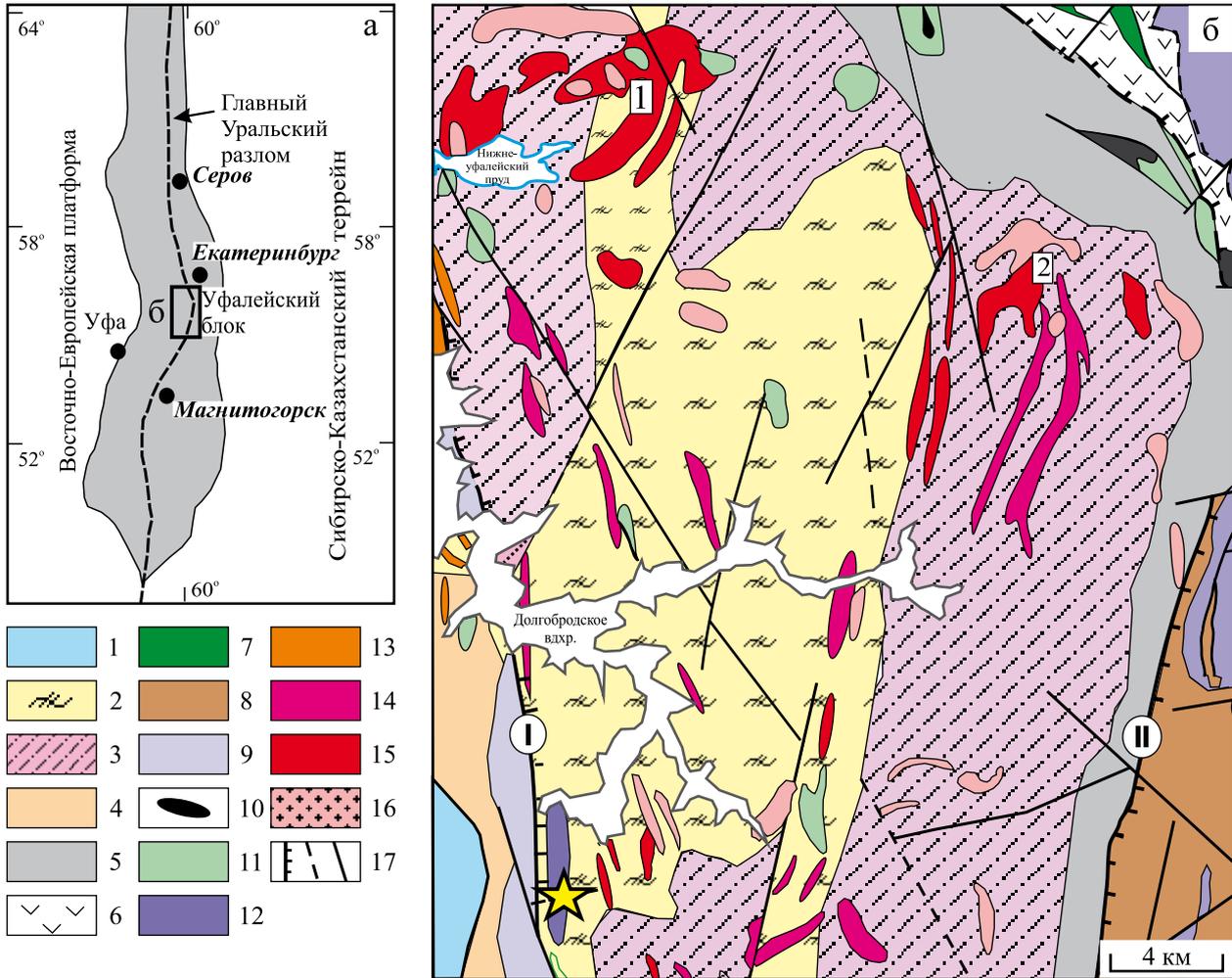


Рис. 1. Положение (а) и геологическая карта центральной и западной частей Уфалейского блока (б), по (Государственная..., 2021) с дополнениями авторов.

1 – ARtr, метаморфиты Тараташского блока; 2 – егустинская свита (PR₁eg): амфиболиты; биотитовые, амфиболовые и амфибол-биотитовые плагиогнейсы, мигматиты; 3 – слюдяногорская свита (PR₁sl): амфиболиты, часто рутилсодержащие, биотитовые, биотит-амфиболовые плагиогнейсы с прослоями кварцитов и слюдяно-кварцевых сланцев, плагиоклазовые и двуполевошпатовые мигматиты; 4 – таганайская свита (RF₂tg): слюдяные кварциты, реже слюдяно-кварцевые сланцы с гранатом, ставролитом, графитом; 5 – куртинская свита (RF₂kr): гранат-слюдяно-кварцевые и слюдяно-кварцевые сланцы с прослоями слюдяных кварцитов, цоизитовые и гранатовые амфиболиты, графит-слюдяно-кварцевые сланцы и гнейсы, графитовые и слюдяные кварциты; 6–9 – O₂-S₁ вулканогенно-осадочные породы зоны Главного Уральского разлома; 10 – гипербазиты; 11 – габбро; 12 – клинопироксениты (Шигирские сопки); 13 – граносиениты и сиениты (козлингорский комплекс) (O₃); 14 – гранитогнейсы (битимский комплекс) (PR₃); 15 – гранодиориты и граниты (уфалейкинский комплекс) (C₂); 16 – граниты и лейкограниты (кизильский комплекс) (P₂); 17 – разрывные нарушения различных порядков. Римские цифры в кружках: I – Уфимский разлом, II – Главный Уральский разлом. Гранитные массивы (цифры в прямоугольниках): 1 – Нижнеуфалейский массив, 2 – Никольский массив. Желтая звезда (вне масштаба) – место отбора пробы Пс-2926.

Fig. 1. Position (a) and geological map of the central and western parts of the Ufaley block (b), according to (Gosudarstvennaya..., 2021), with additions by authors.

1 – ARtr, metamorphites of the Taratash block; 2 – Egusta Formation (PR₁eg): amphibolites; biotite, amphibole and amphibole-biotite plagiogneisses, migmatites; 3 – Sludyanogorsk Formation (PR₁sl): amphibolites, often rutile-containing, biotite, biotite-amphibole plagiogneisses with layers of quartzites and mica-quartz shales, plagioclase and two-feldspar migmatites; 4 – Taganay Formation (RF₂tg): micaceous quartzites, less commonly micaceous quartz shales with mica quartzite layers, zoisite and garnet amphibolites, graphite-mica-quartz shales and gneisses, graphite and mica quartzites; 5 – Kurta Formation (RF₂kr): garnet-mica-quartz and mica-quartz shales with mica quartzite layers, zoisite and garnet amphibolites, graphite-mica-quartz shales and gneisses, graphite and mica quartzites; 6–9 – O₂-S₁ – volcanogenic sedimentary rocks of the Main Uralian Fault zone; 10 – ultrabasic rocks; 11 – gabbro; 12 – clinopyroxenites (Shigirsky Sopki); 13 – granosyenites and syenites (Kozlinogorsk complex) (O₃); 14 – granite-gneisses (Bitim complex) (PR₃); 15 – granodiorites and granites (Ufaleykinsky complex) (C₂); 16 – granites and leucogranites (Kizil complex) (P₂); 17 – faults of various orders. Roman numerals in circles: I – Ufa fault, II – Main Uralian fault. Granite massifs (numbers in rectangles): 1 – Nizhneufaleysky massif, 2 – Nikolsky massif. The yellow star (out of scale) is the sampling point (Pe-2926).

и др.). Отметим, что для израндитов U-Pb методом по цирконам установлен архейский возраст протолита (2696 млн лет) и PR (2022–2004 млн лет) возраст метаморфизма (Синдерн и др., 2006; Краснобаев и др., 2011; Ронкин и др., 2012; Тевелев и др., 2015; Сомсикова и др., 2022). Однозначных геологических взаимоотношений между пироксенитами ШС и породами окружающей гнейсово-амфиболитовой толщи егустинской свиты не установлено. По мнению А.И. Белковского (1989), пироксениты представляют собой тектонический блок среди метаморфических пород. В Объяснительной записке к геологической карте пироксениты рассматриваются как линейная интрузия (дайка?) в метаморфитах (Государственная..., 2021). По нашим данным, по разрезу вкост простирания тела ультрамафитов в них фиксируется симметричная зональность по составу пород, что может свидетельствовать в пользу интрузивного характера пироксенитов. Однако такой вывод требует дополнительного подтверждения. В любом случае отсутствие надежных определений возраста окружающих пироксенитов гнейсов и амфиболитов делает неоднозначными интерпретацию генезиса ультраосновных пород и геодинамических условий формирования вмещающих комплексов.

Обобщенные данные геохронологических исследований в Уфалейском блоке представлены в

работе (Коротеев и др., 2006) и отражены на гистограмме (рис. 2). Приведенные данные фиксируют рост количества датировок от кембрия до позднего палеозоя включительно и наличие лишь единичных определений, соответствующих протерозойскому времени, которые, как показано выше, вызывают определенные сомнения. Амфиболиты егустинской свиты, окружающие пироксениты ШС, содержат ничтожное количество очень мелкого циркона, выделение и датирование которого затруднительны. Чтобы получить представление о природе и возрасте этой толщи или ее вероятного протолита, проведено изучение детритового циркона, выделенного из четвертичных делювиально-элювиальных глинисто-гравийных отложений сухого русла субширотной долины, разделяющей Северную и Южную Шигирские сопки. Протяженность долины не превышает 1 км, т. е. область сноса кластогенного материала захватывает пироксениты Шигирских сопки и окружающие их гнейсы и амфиболиты егустинской свиты. Других пород на этом участке не отмечено. Это не исключает возможность контаминации опробованными четвертичными отложениями материала из других частей УБ, цирконы из которых преимущественно имеют ранне- и среднепалеозойский и реже вендский возраст (Коротеев и др., 2009; Краснобаев и др., 2010; Шардакова, 2016а, б; Шардакова, Червяковский,

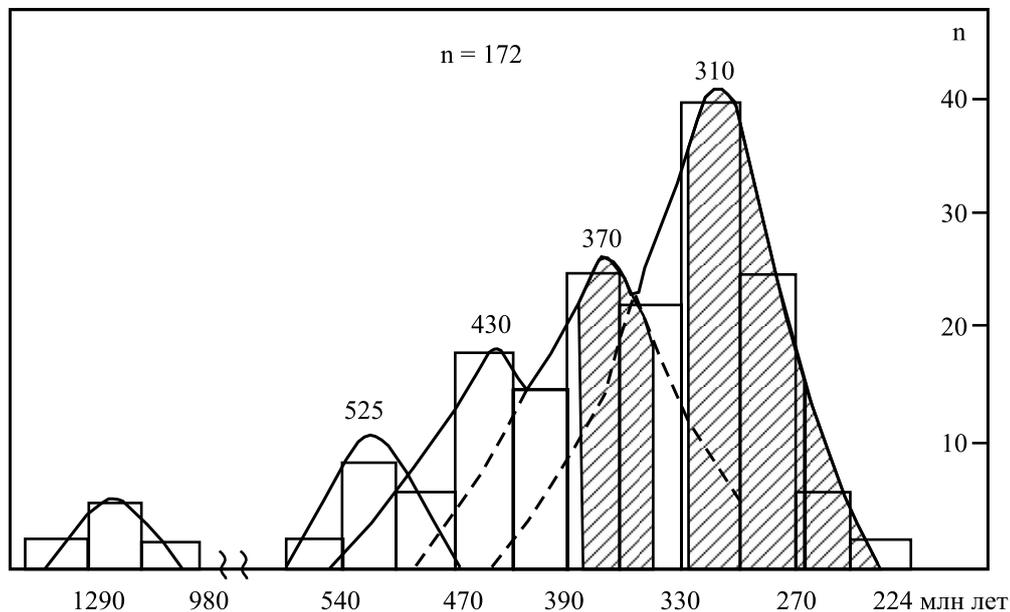


Рис. 2. Гистограмма распределения геохронологических данных, полученных разными методами, для образований Уфалейского блока, по (Коротеев и др., 2009).

Заштрихованные области – возраст “мягкой” (ранней) и “жесткой” (поздней) коллизий.

Fig. 2. Distribution histogram of the of geochronological data obtained by various methods for the Ufaley block rocks, according to (Koroteev et al., 2009).

The shaded areas are the ages of the “soft” (early) and “hard” (late) collisions.

2020). Однако, как будет показано ниже, изотопно-геохронологические данные изучения детритового циркона не согласуются с таким предположением.

ПРОБООТБОР И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выделения детритового циркона из четвертичных глинисто-гравийных отложений широтной долины, разделяющей Северную и Южную Шигирские сопки, отобрана проба Пе2926 объемом около 60 л из шурфа глубиной около 1 м. Проба последовательно просеяна до крупности –3 мм. Эта фракция промывалась в лотке до получения темно-серого шлиха. После просушки шлик был просеян на сите 1 мм. Фракция –1 мм разделена на сильномагнитную и немагнитную фракцию ручным магнитом в чехле. Масса немагнитной фракции составила около 50 г. Она представлена следующим набором минералов: кварц, полевой шпат, гранат разного цвета, рутил, амфибол, пироксены, кианит (?), рудный минерал черного цвета, пирит, апатит, циркон. Среди разных по размеру, форме и цвету зерен циркона отчетливо выделялся преобладающий тип, представленный короткопризматическими или округлыми неокатанными или слабоокатанными зернами красновато-бурого или вишнево-красного цвета размером от 0.1 до 0.6 мм (рис. 3, 4а–в).

Более редкая популяция циркона размером менее 100 мкм представлена неокатанными прозрачными призматическими зернами розового, светло-желтого или светло-медового цвета (рис. 4д–з). Всего для изучения под бинокулярным микроскопом вручную извлечено 176 зерен циркона. Они смонтированы в шашку из эпоксидной смолы, отшлифованы и отполированы на алмазной пасте. Перед проведением изотопных исследований препарат очищался спиртом и 3%-й азотной кислотой.

Изучение детритового циркона проведено в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург. Изображения зерен циркона в обратно рассеянных электронах (BSE) и режиме катодolumинесценции (CL) получены на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira, определение состава микровключений в цирконах выполнено с использованием энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 (оператор Л.В. Леонова).

U–Th–Pb изотопные исследования выполнены на квадрупольном масс-спектрометре ICP-MS NexION 300S с приставкой для лазерной абляции (LA-ICP-MS) NWR 213. Описание методики и полный набор полученных изотопно-геохронологических данных приведены в работе (Shardakova et al., 2024), доступной по адресу: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1028334X24604073>.

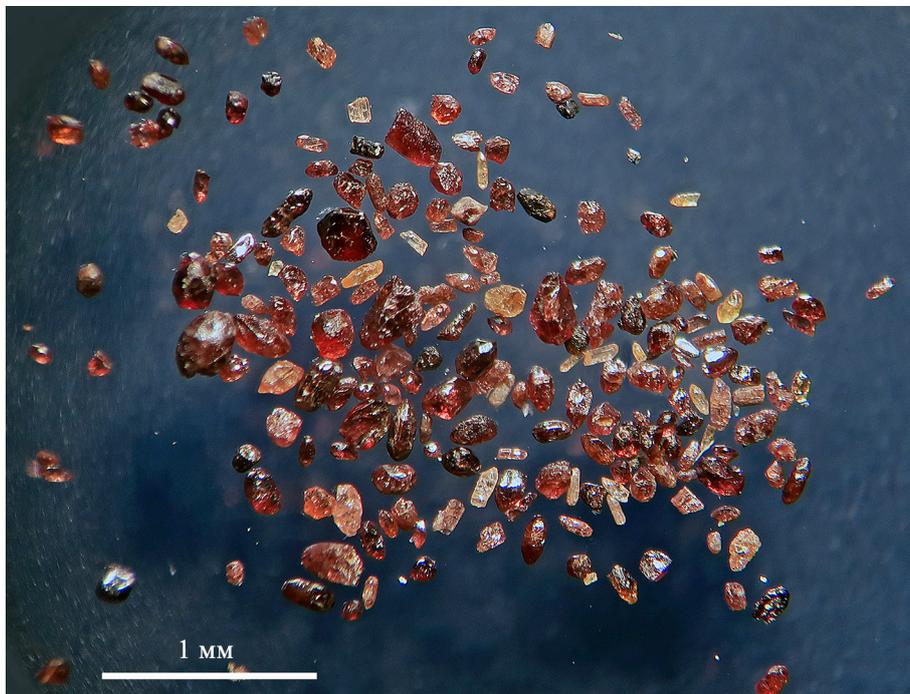


Рис. 3. Внешний облик зерен детритового циркона (часть пробы Пе-2926) из четвертичных гравийно-глинистых отложений обрамления пироксенитов Шигирских сопок Уфалейского блока.

Fig. 3. The view of some representative detrital zircon (Pe-2926) from Quaternary gravel-clay deposits framed pyroxenite of the Shigir hills of the Ufaley block.

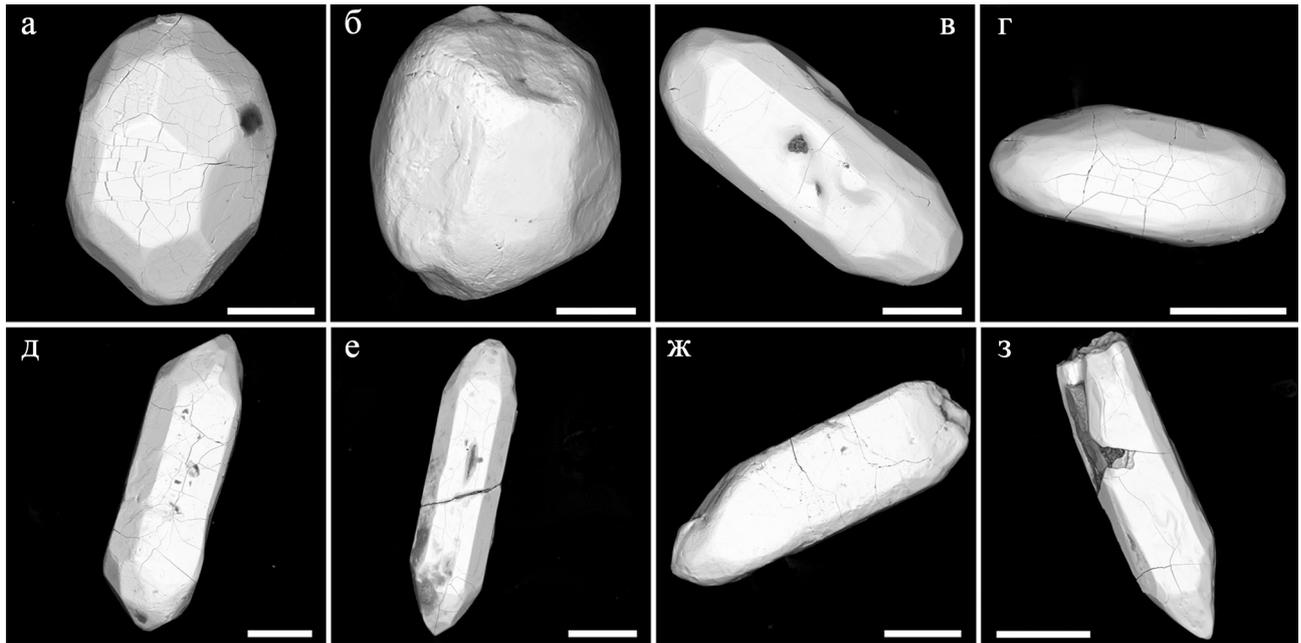


Рис. 4. Характерная форма зерен детритового циркона (проба Пе-2926) из четвертичных гравийно-глинистых отложений обрамления Шигирских сопок.

а–в – цирконы красновато-коричневого и темно-вишневого цвета; г – циркон светло-желтого цвета; д, е – циркон светло-розовый; ж – циркон вишневого цвета; з – циркон розовый. Изображения получены в режиме обратно рассеянных электронов (BSE). Длина масштабной линейки 100 мкм.

Fig. 4. Typical morphology of detrital zircon grains from the Quaternary gravel-clay deposits.

а–в – reddish-brown and dark cherry zircons; г – light yellow zircon; д, е – pink zircon; ж – cherry-colored zircon; з – pink zircon. Images were obtained in the back-scattered electron mode. The scale bar length is 100 microns.

По ядрам и оболочкам зерен циркона получено 253 определения изотопного возраста методом лазерной абляции с индуктивно-связанной плазмой, 109 определений соответствовали конкордантным значениям. Характеризуемая здесь выборка, для которой впоследствии определялись содержания редких элементов, составила 55 зерен, имеющих широкий разброс в возрасте; для всех них $|D| < 10\%$. В табл. 1 представлены геохимические характеристики зерен обломочного циркона и их датировки, требуемые для последующих интерпретаций.

Определение содержания редких элементов в зернах производилось в одной шашке в два этапа. На первом этапе ранее датированные 24 зерна анализировались только на микроэлементы, без иттрия. Кратер для определения содержаний микроэлементов располагался рядом с кратером на изотопный анализ. На втором этапе по 23 зернам проводилось одновременное определение возраста и содержания микроэлементов, включая итрий, в одном кратере согласно методике (Червяковская и др., 2023).

Анализ микроэлементного состава цирконов проведен на ICP-MS NexION 300S (PerkinElmer) с приставкой для лазерной абляции NWR 213. Параметры приставки для ЛА: энергия лазерного излу-

чения – диаметр кратера 25 мкм, частота повторения импульсов – 10 Гц, плотность энергии – 10.5–11.5 Дж/см². Обработка результатов проводилась в программе GLITTER V4.4. с использованием внутреннего стандарта SiO₂, в качестве внешнего первичного стандарта использовали стандартное стекло NISTSRM 610 (в качестве вторичного – стандартное стекло NIST SRM 612), измеренное методом “взятия в вилку” через 10–12 измерений.

Для оценки содержаний Y использована корреляция с Yb, элементом близким к Y по химическим свойствам и позиции в решетке циркона. Измерения показали, что во второй партии Y четко коррелирует с Yb ($r_{\text{corr}} = 0.98$), и величина отношения Y/Yb для цирконов данной выборки лежит в интервале 2.6–3.0 при средней величине 2.832. После этого путем умножения содержания Yb на указанный коэффициент вычислены ориентировочные концентрации Y в первой партии зерен (24 зерна). Ни одна из расчетных величин не превысила уровень содержаний Y в зернах конкретной возрастной популяции. По мнению авторов, такой метод может использоваться для расчета содержания иттрия в цирконе и последующей геохимической интерпретации.

Таблица 1. Возраст (млн лет) и содержание микроэлементов (г/т) в обломочных цирконах

Table 1. Age (Ma) and trace element content (ppm) in clastic zircons

№ п. п.	Точка	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Sc	Ti	Y	La	Ce	Pr	Nd
1	117-1	485	482	437	14.63	1682	0.16	15.93	0.241	6.29
2	126	503	483	515	14.29	5954	3.25	40.06	1.65	18.24
3	111-2	566	544	H.o.	0	1086*	0.25	9.37	0	1.54
4	104	572	546	H.o.	21.01	2237	1.36	20.04	1.09	10.94
5	67-1	2010	2004	H.o.	0	1281*	0.01	14.14	0.154	1.91
6	108-2	2028	2068	H.o.	5.43	858*	0.35	12.3	0.41	3.96
7	149-1	2030	2068	435	11.69	592	0.01	29.63	0.463	5.67
8	148-1	2030	2152	429	8.95	1233	0.01	10.18	0	2.63
9	135-1	2039	2110	419	6.76	1443	0.01	7.9	0.53	6.69
10	133	2040	2044	459	6.84	1597	0.02	24.8	0.46	4.86
11	86-2	2042	1998	H.o.	6.51	301*	0.01	8.59	0.162	2.1
12	74-2	2043	2033	H.o.	14.49	690*	0.49	17.65	0.54	4.32
13	50-2	2044	2160	H.o.	8.6	768*	0.08	26.56	0.118	2.76
14	131	2045	2033	464	4.45	1338	0.01	18.84	0.049	1.53
15	32-2	2045	2127	H.o.	7.62	275*	0.01	21.1	0.48	6.97
16	11-1	2051	2097	H.o.	7.19	501*	0.02	12.43	0.11	2.51
17	171-1	2052	1977	427	8.13	3683	2.07	49.27	1.7	22.62
18	7-1	2054	2202	H.o.	14.26	850*	0.57	20.73	0.45	3.43
19	155	2056	2158	430	4.53	957	0.01	18.82	0.189	2.93
20	21-1	2057	1943	H.o.	6.04	669*	0.062	17.2	0.17	3.38
21	175-1	2060	2149	470	12.16	1074	0.014	21.04	0.19	2.92
22	10-1	2063	2193	H.o.	4.81	1086*	0.027	23.49	0.123	3.26
23	163-1	2067	2066	435	5.45	781	0.01	17.9	0	2.32
24	156	2069	2068	505	9.29	624	0.01	19.53	0	1.23
25	175-2	2072	2081	465	0	941	0.02	24.12	0.127	1.78
26	36-1	2095	2028	H.o.	12.46	478*	0.24	18.47	0.238	2.78
27	86-1	2106	2091	H.o.	17.7	858*	0.24	14.61	0.73	6.61
28	38-3	2291	2251	H.o.	23.06	764*	0.47	40.8	0.74	1.29
29	139-1	2343	2358	431	15.59	380	0.48	2.94	0.3	4.76
30	110-1	2500	2521	H.o.	0	787*	0.01	5.61	0.172	0.97
31	147-1	2697	2793	414	8.5	2018	0.08	31.82	0	1.13
32	82	2730	2799	H.o.	9.08	500*	0.30	16.49	0.166	2.25
33	55	2776	2887	H.o.	4.5	1005*	0.03	12.03	0	0
34	33	2853	3085	H.o.	9.43	1608	0.82	36.54	0.94	10.47
35	28-2	2863	2687	H.o.	3.67	452*	0.01	16.79	0	1.31
36	20	2863	2667	394	5.42	542	0.01	16.93	0.14	0.84
37	28-1	2864	2798	H.o.	7.8	751*	0.01	23.76	0.148	1.04
38	176-1	2900	2899	503	0	920	0.03	24.56	0.181	4.55
39	152-1	2923	2813	443	24.13	1059	0.01	6.21	0.199	2.62
40	1-2	3006	2804	392	5.3	449	0.01	3.04	0.073	1.39
41	70-1	3074	3167	H.o.	6.24	1190*	0.01	4.51	0.05	0
42	70-2	3115	3177	H.o.	5.65	859*	0.07	2.5	0.014	0.7
43	77**	2032	1898	666	3.23	1161	0.01	4.41	0.091	1.85
44	66	2033	2175	H.o.	21.62	919*	2.18	13.38	1.93	9.26
45	103	2040	1977	641	4.29	992	0.94	13.75	0.68	4.44
46	84-1	2085	2250	H.o.	14.62	2070	4.2	29.94	3.38	22.01
47	13	2099	2039	447	3.21	681	0.84	8.48	0.74	4.25
48	27-1	2099	2163	H.o.	20.1	658*	6.08	87.93	5.16	20.22
49	108-1	2192	2197	H.o.	13.14	1104*	5.31	35.16	3.74	25.22
50	38-2	2316	2250	H.o.	22.59	1225*	0.95	34.72	0.46	6.32
51	119	2346	2262	369	17.26	1437	8.44	35.37	6.26	33.01
52	89	2445	2689	H.o.	14.47	1480	0.8	10.04	0.55	5.12
53	5-1	2933	2825	H.o.	27.14	1974*	1.05	51.91	0.87	8.34
54	46-1	3101	3103	H.o.	8.01	610*	0.99	15.65	0.79	5.1
55	46-2	3124	3148	H.o.	9.05	1057	0.55	11.25	0.166	1.74

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continuation

№ п. п.	Точка	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	117-1	8.85	4.1	44	12.89	143.32	55.05	262.81	63.99	713.29	112.73
2	126	34.24	10.32	158.55	53.79	667.57	221.49	937.93	201.66	1961.42	254.65
3	111-2	3.62	0.88	13.46	4.3	59.36	21.44	113.68	29.38	383.36	71.62
4	104	13.32	3.02	51.92	15.72	210.1	73.31	325.91	73.09	790.01	110.22
5	67-1	3.86	0.187	30.33	8.95	115.09	42.83	184.07	42.98	452.36	62.35
6	108-2	5.77	0.46	27.73	7.39	97.06	29.91	131	31.36	303.06	43.23
7	149-1	9.7	0.86	36.93	11	122.71	42.3	187.86	43.65	199.09	27.66
8	148-1	5.82	1.26	16.33	4.61	52.91	19.1	83.31	20.34	420.5	58.47
9	135-1	10.92	2.67	50.16	14.54	163.31	54.44	211.1	45.02	428.37	58.22
10	133	10.81	0.89	42.03	13.6	163.16	55.79	238.48	53.9	570.56	75.99
11	86-2	2.21	0.78	8.78	2.8	29.73	9.6	45.38	9.7	106.26	16.19
12	74-2	3.91	0.57	14.18	5.2	68.33	24.33	109.38	25.96	243.57	36.76
13	50-2	4.65	0.64	18.6	6.1	80.21	27.59	115.3	27.61	271.29	40.67
14	131	2.57	0.28	8.86	2.79	32.88	11.46	45.55	11.64	464.32	63.04
15	32-2	12.61	1.25	43.75	11.77	146.36	46.18	202.3	43.81	97.09	17.33
16	11-1	3.68	0.393	21.24	5.68	65.45	20.63	82.94	18.6	177.06	26.38
17	171-1	35.38	8.27	124.06	37.36	396.69	120.22	493.42	107.92	1073.22	139.41
18	7-1	3.01	0.68	14.25	5	60.27	23.65	108	26.44	300.17	48.07
19	155	6.12	0.57	23.76	7.24	93.85	31.9	135.68	32.57	319.92	43.67
20	21-1	6.16	0.69	27.33	7.79	81.69	28.25	118.28	24.98	236.19	39.42
21	175-1	5.03	0.62	27.1	8.94	98.34	36.03	162.19	34.27	339.49	45.58
22	10-1	5.47	0.45	32.96	9.8	126.07	45.82	195.22	42.1	383.54	59.7
23	163-1	2.36	0.372	16.6	5.82	69.28	26.02	112.12	27.54	274.1	36.4
24	156	2.77	0.231	12.78	4.37	60.01	21.29	90.11	21.92	215.24	30.61
25	175-2	4.39	0.44	21.86	7.65	89.57	30.52	137.42	29.69	298.75	42.42
26	36-1	2.81	0.242	9.92	3.63	44.59	16.47	77.35	16.67	168.74	28.11
27	86-1	7.75	1.78	35.08	9.42	114.49	36.11	148.19	32.58	303.01	41.77
28	38-3	3.67	0.47	15.37	5.35	59.36	24.42	130.59	27.99	269.64	48.38
29	139-1	9.52	0.36	23.13	6.06	53.24	14.21	35.2	7.09	51.13	5.83
30	110-1	3.25	0.21	19.13	8.12	103.97	34.61	135.1	26.24	278.02	40.43
31	147-1	5.35	0.47	29.13	11.65	160.67	65.39	307.99	76.28	808.59	110.17
32	82	3.33	0.69	16.69	4.33	49.81	16.24	74.91	16.14	176.42	26.53
33	55	1.95	0.104	15.57	5.23	72.95	27.79	133.23	33.56	354.78	56.2
34	33	14.69	1.19	64.24	16	192.43	67.28	291.88	59.32	567.63	86.32
35	28-2	2.65	0.49	14.51	4.66	56.65	20.09	80.76	19.67	159.6	26.33
36	20	1.85	0.159	10.33	3.62	42.1	15.97	69.96	17.16	199.74	27.11
37	28-1	4.95	0.316	24.48	7.22	89.23	31.31	128.75	29.05	265.35	41.08
38	176-1	4.61	0.92	22.64	8.33	82.35	29.34	119.77	28.66	306.25	43.26
39	152-1	4.55	0.8	22.19	6.95	100.3	36.33	165.43	39.78	420.01	58.87
40	1-2	4.38	0.87	9.2	2.69	43.57	14.16	65.69	18.79	209.22	29.57
41	70-1	2.78	0.76	16.05	5.64	84.8	32.48	155.55	39.01	420.16	63.22
42	70-2	1.41	0.65	12.92	4.32	56.96	23.01	108.41	27.99	303.29	46.2
43	77**	4.91	0.55	22.86	10.11	119.08	42.06	179.15	40.6	395.89	55.47
44	66	5.28	2.31	16.84	6.52	78.11	29.03	125.72	30.05	324.61	45.01
45	103	7.85	1.24	26.46	9.59	99.33	34.29	141.28	32.28	326.19	42.48
46	84-1	16.44	2.28	63.69	18.33	204.66	67.49	288.36	69.25	730.97	103.35
47	13	4.88	0.67	16.21	5.65	69.15	23.71	102.66	21.98	207.6	28.68
48	27-1	13.62	3.51	26.28	6.62	69.17	24.79	108.94	24.5	232.26	38.49
49	108-1	10.21	1.63	33.17	9.42	101.51	36.36	168.15	36.19	389.74	61.55
50	38-2	4.74	0.85	23.86	8.42	109.42	39.42	192.11	46.48	432.7	69.5
51	119	26.78	2.16	38.76	11.29	129.12	46.47	227.01	61.62	678.28	92.01
52	89	2.89	1.84	16.77	6.14	81.88	35.64	180.32	46.96	522.5	80
53	5-1	13.4	4.71	66.71	21.47	242.44	82.6	336.9	73.36	697.13	106.77
54	46-1	5.78	1.05	17.15	6.77	75.6	25.87	117.73	23.46	215.39	34.41
55	46-2	1.71	0.57	11.25	4.7	64.59	25.94	132.69	33.36	373.12	66.08

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

№ п. п.	Точка	Hf	U	Th	REE общ.	(Sm/La) _n	Ce/Ce*	Th/U
1	117-1	7939	107.42	172.85	1443.65	88.50	19.64	1.61
2	126	8126	311.14	528.32	4564.82	16.86	4.19	1.70
3	111-2	13750	123.39	86.07	712.27	23.17	45.36	0.70
4	104	11466	192.63	200.08	1700.05	15.67	3.98	1.04
5	67-1	11619	320.21	298.49	959.22	617.60	87.22	0.93
6	108-2	14740	473.54	296.59	693.99	26.38	7.86	0.63
7	149-1	8427	97.84	359.08	443.35	931.20	77.92	1.12
8	148-1	8564	172.51	109.82	969.75	1552.00	105.41	2.08
9	135-1	8061	179.13	227.75	1053.88	1747.20	26.27	1.27
10	133	11027	604.21	557.69	1255.52	91.03	20.31	0.92
11	86-2	9903	336.39	134.7	242.42	25.44	13.86	0.40
12	74-2	11208	364.32	275.19	555.19	12.77	8.31	0.76
13	50-2	10235	190.24	267.19	622.18	88.57	64.58	1.40
14	131	10827	367.61	389.31	1063.95	2017.60	73.72	1.06
15	32-2	11063	119.35	141.83	251.00	30.92	56.49	1.19
16	11-1	10843	214.3	249.05	437.12	294.40	64.44	1.16
17	171-1	7787	506.59	1058.62	2611.61	27.35	6.36	2.09
18	7-1	10454	859.56	230.27	614.72	8.45	9.91	0.27
19	155	9545	256.07	267.89	717.23	979.20	104.79	1.05
20	21-1	12141	220.85	281.11	591.59	158.97	40.55	1.27
21	175-1	9871	211.33	252.4	781.88	57.49	31.23	1.19
22	10-1	11134	262.47	247.04	928.03	324.15	98.67	0.94
23	163-1	10264	207.17	238.17	590.94	377.60	137.02	1.15
24	156	12591	450.96	384.87	480.20	443.20	149.50	0.85
25	175-2	9673	232.63	266.71	688.85	60.03	47.90	1.15
26	36-1	10888	137.01	145.38	390.26	18.66	18.67	1.06
27	86-1	8328	132.75	212.41	752.37	51.03	8.40	1.60
28	38-3	11993	231.78	190.38	628.54	12.49	16.75	0.82
29	139-1	12500	247.17	166.58	214.25	31.73	1.88	0.67
30	110-1	16771	322.13	112.82	655.95	42.62	9.37	0.35
31	147-1	10726	1942.28	998.92	1608.82	111.17	87.78	0.51
32	82	9487	423.77	242.09	404.30	17.70	17.86	0.57
33	55	13201	1248.3	325.61	713.43	94.55	506.91	0.26
34	33	10703	1443.68	1002.93	1409.75	28.66	10.07	0.69
35	28-2	12499	155.43	186.69	365.00	296.00	109.92	1.20
36	20	9777	515.3	319.72	444.45	424.00	406.42	0.62
37	28-1	12328	223.16	308.76	646.81	64.39	42.63	1.38
38	176-1	8662	284.95	268.53	675.45	295.04	88.38	0.94
39	152-1	7203	190.45	111.03	864.25	728.00	33.70	0.58
40	1-2	7599	298.54	114.83	402.65	700.80	27.24	0.38
41	70-1	8866	103.17	49.1	825.02	444.80	48.82	0.48
42	70-2	8767	72.64	29.42	588.44	32.23	19.33	0.41
43	77**	12246	494.48	168.78	877.04	785.60	35.39	0.34
44	66	10063	1228.07	170.17	690.23	3.88	1.58	0.14
45	103	10501	771.71	354.39	740.80	13.36	4.16	0.46
46	84-1	12525	669.04	558.63	1624.35	6.26	1.92	0.83
47	13	9424	1081.8	165.54	495.50	9.30	2.60	0.15
48	27-1	10421	472.05	266.3	667.57	3.58	3.80	0.56
49	108-1	14643	647.04	320.53	917.36	3.08	1.91	0.50
50	38-2	11925	412.06	334.03	969.95	7.98	12.71	0.81
51	119	12781	1027.26	376.2	1396.58	5.08	1.18	0.37
52	89	9894	427.73	62.78	991.45	5.78	3.66	0.15
53	5-1	8622	838.66	878.73	1707.66	20.42	13.15	1.05
54	46-1	10583	130.16	109.6	545.74	9.34	4.28	0.84
55	46-2	11843	1769.14	378.82	727.72	4.97	9.01	0.21

Примечание. *Расчитанные содержания Y; все цирконы, расположенные ниже № 43 (точки 77**), по составу и облику отвечают в разной степени измененным разностям. Н.о. – элемент не определялся.

Note. *The calculated Y contents are noted by; all zircons located below No. 43 (points 77**) correspond to varying degrees of altered differences in composition and appearance. H.o. – the element was not determined.

Для определения генезиса цирконов использовались величины отношения Th/U, диаграммы (Sm/La)_n-Ce/Ce*, La-(Sm/La)_n (Hoskin, 2005), Hf-U/Yb, Yb-U (Grimes et al., 2007). Оценка предполагаемого состава протолита детритового циркона выполнена согласно методике CART2000 и анализу соотношений Hf-Y, подробно описанным в работе (Belousova et al., 2002).

Отметим также, что в данной работе мы используем названия стратиграфических подразделений докембрия согласно Международной стратиграфической шкале (Cohen et al., 2013), включающей для архея четыре эратемы (AR₁₋₄), для протерозоя – три (PR₁₋₃), где самый верхний стратон неопротерозоя – эдиакарий (635–541 млн лет). Последний термин мы далее употребляем для описания возраста относительно молодой популяции цирконов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристика детритового циркона.

Большая часть (>50%) всех изученных зерен детритового циркона представлена полупрозрачными короткопризматическими или округлыми кристаллами и обломками буровато-красного или вишневого цвета размером 0.1–0.6 мм (см. рис. 4а–в, ж). Отдельные зерна достигают размера 0.8–1.0 мм. Более распространены неокатанные индивиды с хорошо развитыми гранями 010, 100, 110, 111, реже присутствуют слабоокатанные цирконы. На СL-изображениях они обычно имеют темные незональные ядра, окруженные более светлыми оболочками; изредка встречается обратная ситуация. Для некоторых зерен характерны ядра с осцилляторной зональностью, похожей на магматическую. Отмечаются ядра с пятнистой, секториальной или параллельной зональностью, иногда со следами растворения, перекристаллизации или регенерации. Облик и внутреннее строение детритовых цирконов иллюстрирует рис. 5.

Около трети выборки представлены полупрозрачным цирконом светло-розовой, светло-желтой и медовой окраски длиной 0.1–0.5 мм при L = 1:2–1.0:2.5 (см. рис. 4г). Зерна этой популяции имеют слабо скругленные очертания с развитыми гранями 010, 110, 111, изредка – 311. Центральные темные зоны таких цирконов занимают от 50 до 90% площади зерна, имеют пятнистое, слабозональное или секториальное строение со следами растворения. Цирконы обрастают очень тонкой светлой внешней каймой.

Около 20% изученных зерен образуют призматические кристаллы размером 300 мкм и менее желтоватой или слаборозовой окраски или бесцветные (см. рис. 4д–е), L = 1:3–1:5, неокатанные либо обломочные, с преимущественным развитием граней 010, 110, 111. В цирконах этого типа видны темные ядра, зональные промежуточные

части и обрастание более светлым зональным материалом.

Около 5–10% от всех изученных зерен детритового циркона, имеющих разную морфологию и возраст, содержат мономинеральные и полиминеральные включения (рис. 6). Среди них микрозондовыми исследованиями (см. выше) определена устойчивая ассоциация кварца, калиевого полевого шпата, апатита, мусковита и биотита (см. рис. 6д, е), которая встречается чаще всего и соответствует парагенезисам гранитов или гнейсов кислого состава. Ряд цирконов содержит многочисленные мелкие включения монацита, ксенотима, торита, уранинита и других редкометалльных и редкоземельных минералов. Для цирконов с такими включениями характерна высокая степень U-Pb изотопной discordантности, что связано, по-видимому, с влиянием радиоактивного распада минералов-узников. Данная ассоциация минералов в УБ характерна для сиенитоидов и субщелочных гранитов козлинского комплекса, тела которых секут гнейсы и амфиболиты егустинской свиты вблизи ШС (Белковский и др., 2018).

Изредка циркон содержит включения глиноземистого амфибола, кислого и среднего плагиоклаза, альмандинового граната с примесью пиропового, спессартинового и гроссулярового компонентов, ильменита, магнетита и фенгита, что может указывать на метаморфическую природу материнских пород. Одно из включений идентифицировано как барит, встречается также галенит. Некоторые фазы не поддаются надежному определению из-за мелких размеров. Доминирующая минеральная ассоциация включений в детритовом цирконе свидетельствует о коровой природе протолита.

Возраст детритового циркона. Для изотопного U-Pb датирования использовано 176 зерен детритовых цирконов из пробы Пе2926. По ним было получено 253 определения, из которых 109 являются конкордантными ($D/ < 5\%$), а 22 – субконкордантными ($5\% < D/ < 10\%$). Все полученные значения возраста укладываются в интервал 3124–485 млн лет с резко доминирующим максимумом на уровне 2100–2000 млн лет, отвечающему палеопротерозою (рис. 7) (76% всех конкордантных датировок). На гистограмме отчетливо фиксируются также небольшие максимумы, отвечающие мезоархею, неоархею и интервалу верхний неопротерозой (эдиакарий)–нижний ордовик. Последний диапазон соответствует наиболее часто встречающимся датировкам циркона, полученным для пород центральной части Уфалейского блока (Краснобаев и др., 2010; Шардакова, Червяковская, 2020).

Необходимо отметить полное отсутствие в изученной пробе детритовых цирконов с датировками 1800–800 млн лет, в том числе и с датировками 1650–1400 млн лет, близкими к возрасту цирко-

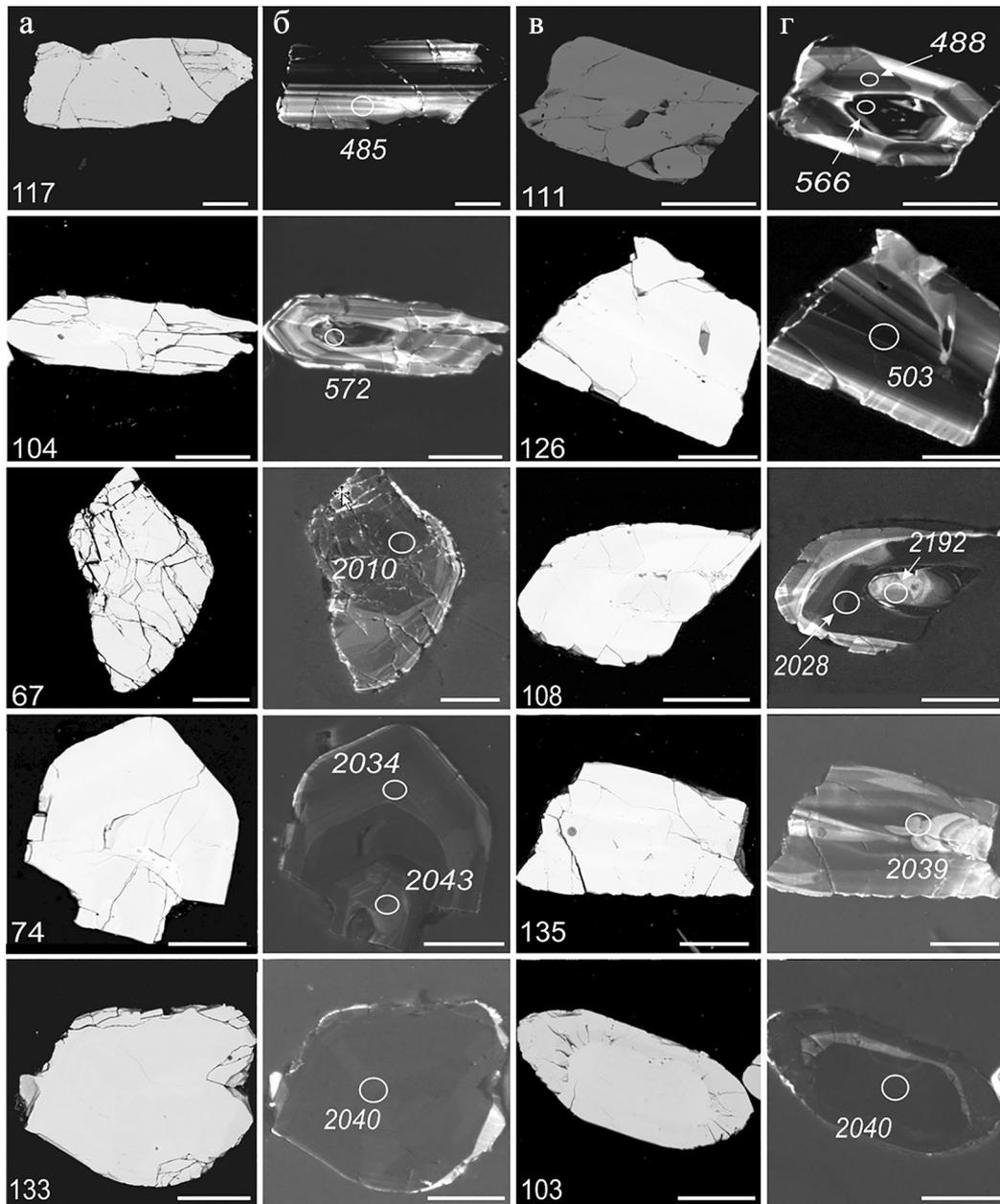


Рис. 5. Микрофотографии зерен циркона (проба Пе-2926) в обратно рассеянных электронах (а, в) и в режиме катодолуминесценции (б, г) с положением кратеров лазерной абляции и значениями U-Pb возраста (млн лет). Длина масштабной линейки 100 мкм.

Fig. 5. Micrographs of zircon grains (Pe-2926) in backscattered electrons (а, в) and in cathodoluminescence mode (б, г) with the position of laser ablation craters and U-Pb age values (Ma).

The length of the scale bar is 100 μm .

нов из пироксенитов ШС (Краснобаев и др., 2013). То есть, несмотря на положение пробы непосредственно у подножия ШС, сложенных пироксенитами, циркон из них как будто не поступал в четвертичные отложения, что вызывает определенные вопросы. (Одна из возможных причин: количество обломочных зерен, вынесенных из клинопи-

роксенитов, ничтожно, так как содержания циркона в этих породах крайне низкие и сами зерна очень мелкие).

Возрастной интервал 2100–2000 млн лет надежно установлен при датировании циркона из пород Тараташского и Александровского блоков, расположенных к юго-западу от УБ. По данным мно-

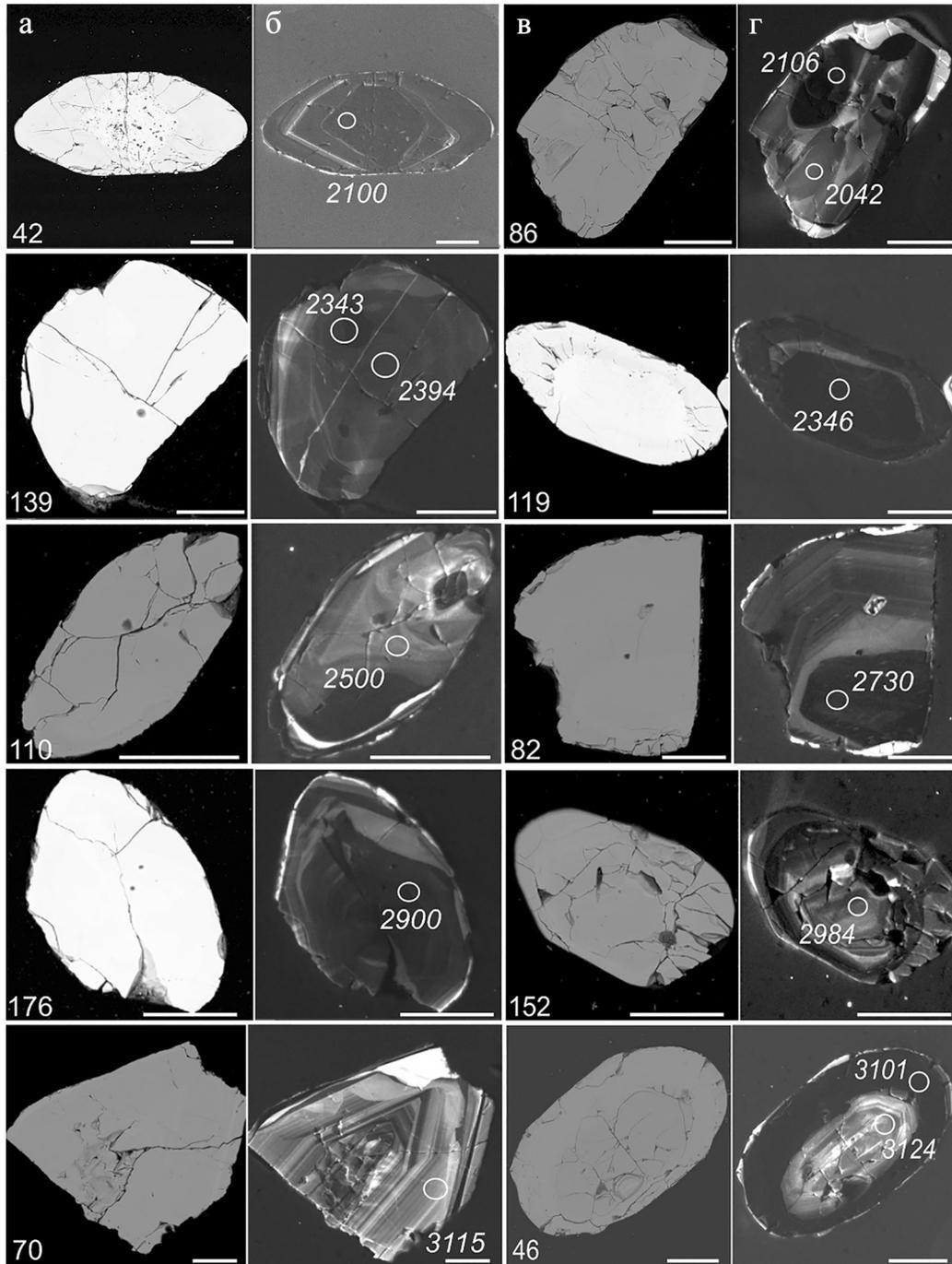


Рис. 5 (окончание). BSE-(а, в) and CL-(б, д)изображения типичных зерен обломочного циркона (проба Пе-2926) с положением кратеров лазерной абляции и значениями изотопного U-Pb возраста (млн лет).

Длина масштабной линейки 100 мкм.

Fig. 5 (ending). BSE-(а, в) and CL-(б, д)images of typical grains of detrital zircon (Pe-2926) with the position of laser ablation craters and U-Pb isotopic age values (Ma).

The length of the scale bar is 100 μm .

гих исследователей, в это время в указанных комплексах активно протекают процессы метаморфизма, анатексиса архейских гранулитов, происходит

формирование мигматитов и внедрение гранитоидных интрузий (Синдерн и др., 2006; Пыстин и др., 2012; Тевелев и др., 2015; Пыстин, Пыстина, 2015).

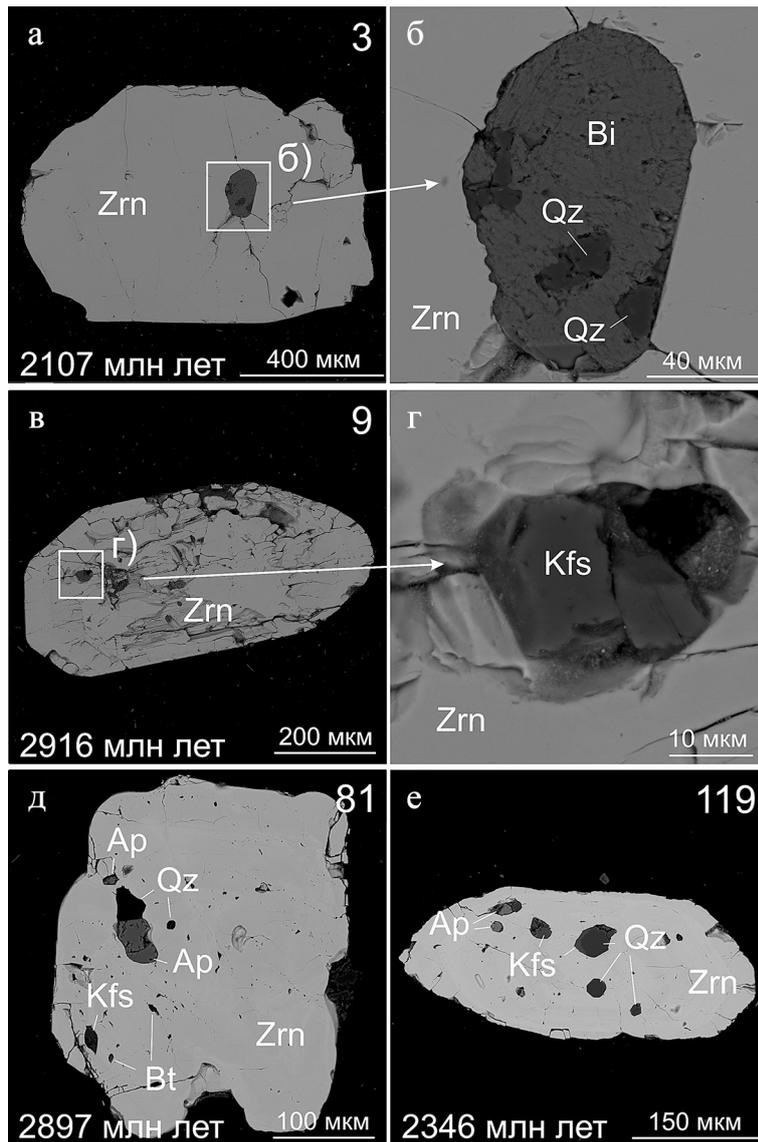


Рис. 6. Микрофотографии включений в зернах детритового циркона (проба Пе-2926).

Изображения в обратно рассеянных электронах. Индексы минералов по (Warr, 2021): *Zrn* – циркон, *Qz* – кварц, *Kfs* – калиевый полевой шпат, *Ap* – апатит, *Bt* – биотит.

Fig. 6. BSE-micrographs of inclusions in grains of detrital zircon.

Mineral indices according to (War, 2021): *Zrn* – zircon, *Qz* – quartz, *Kfs* – potassium feldspar, *Ap* – apatite, *Bt* – biotite.

Вероятно, часть датировок детритового циркона, представляющих в нашем случае главный возраст пик, может фиксировать не “общность” протолита, а время указанных событий, синхронно проявленных в Тараташском, Александровском и Уфалейском блоках.

Одновременно при столкновении протократонов Волго-Уралии и Сарматии образуется Волго-Сарматский коллизионный ороген, сложенный кристаллическими комплексами с датировками 2000–2100 млн лет (Кузнецов и др., 2013). Эрозия этих образований приводит к накоплению детритово-

го циркона возрастом 2064 млн лет в основании айской свиты нижнего рифея (там же). Явное совпадение в профиле кривых распределения относительных вероятностей возрастов изученных зерен из УБ и цирконов из пород Тараташского блока (Тевелев и др., 2015) может указывать на сходство в истории геологического развития этих образований. Предположение о том, что часть детритового циркона привнесена из промежуточных коллекторов, существовавших на рассматриваемой территории после перми–триаса, не подтверждается из-за отсутствия в изученной выборке цирконов с ниже-

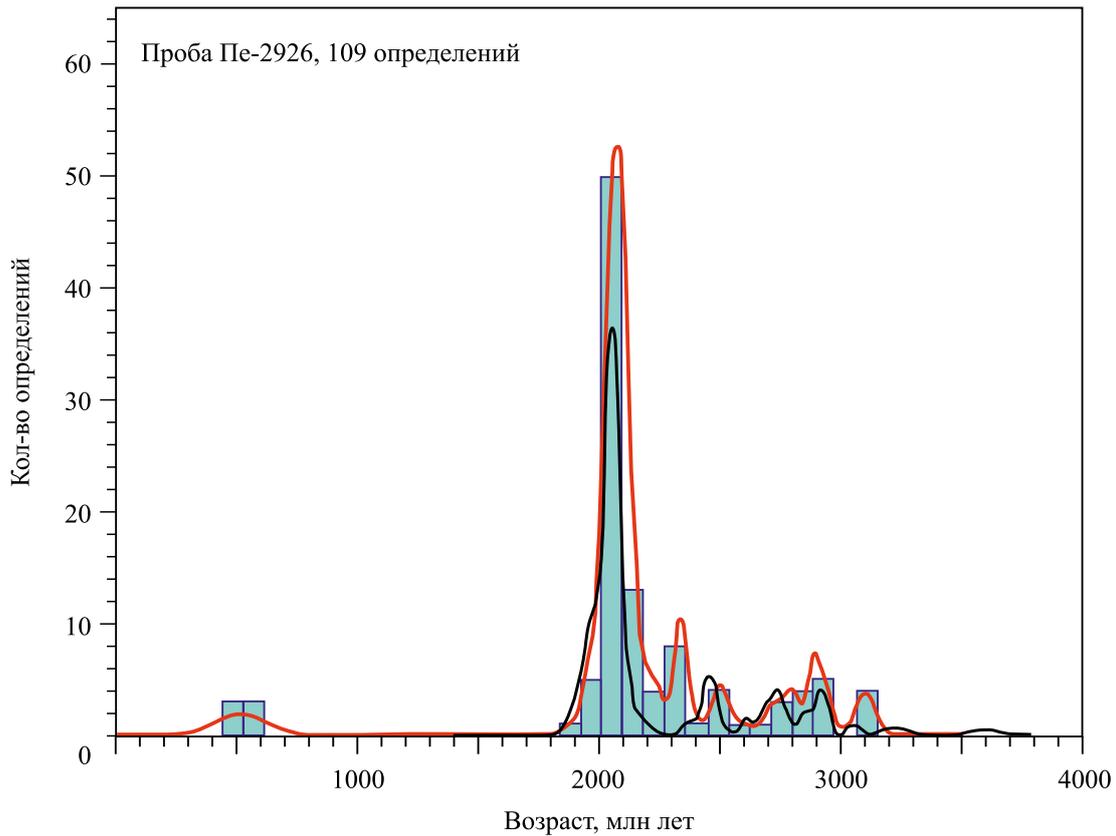


Рис. 7. Гистограмма распределения, кривая относительной вероятности (красная линия) возрастов детритового циркона из четвертичных отложений Уфалейского блока и кривая относительной вероятности (черная линия) распределения возрастов детритового циркона из песчаников айской свиты верхнего палеопротерозоя (Кузнецов и др., 2013).

Fig. 7. Histogram and relative probability curve (red line) showing ages of detrital zircon from the Quaternary deposits of the Ufaley block and the relative probability curve (black line) showing the age distribution for detrital zircon from sandstones of the Ai Formation of the Upper Paleoproterozoic age (Kuznetsov et al., 2013).

и среднепалеозойским и мезозойским возрастом. Хотя, в принципе, если такой циркон и отсутствует, коллекторы теоретически могут существовать.

Геохимические характеристики детритового циркона. В изученных нами детритовых цирконах обычно величина $Th/U > 0.3$ (до 2.1) и не зависит от возраста и внутренней структуры зерен (см. табл. 1). Единичные цирконы с $Th/U = 0.1-0.2$ никакой геохимической спецификой не обладают. Считается, что величина отношения Th/U является одним из критериев, позволяющих отличать магматические цирконы от преобразованных разностей (Hoskin, Schaltegger, 2003; Fu et al., 2009; Hu et al., 2012; Li et al., 2014; Zhong et al., 2018). Низкие величины этого отношения чаще имеют цирконы метаморфического генезиса, но есть и обратные случаи (Harrison, Schmitt, 2007). Исследователи приводят разные граничные величины этого параметра: 0.5 по (Kirkland et al., 2015), 0.2 по (Hoskin, Schaltegger, 2003), и даже 0.1 (Teipel et al., 2004). Отмечается также, что статистически $Th/U > 1.5$ чаще фиксиру-

ются в цирконах из базитов (Kaczmarek et al., 2008; Linnemann et al., 2011; Романюк и др., 2018). Многочисленные новые данные показывают, что значение отношения Th/U изменчиво в цирконах из пород разного генезиса, и лишь в отдельных случаях может быть использовано в качестве индикатора их природы (Арзамасцев и др., 2007; Каулина, 2010; Балашов, Скублов, 2011; Кожевников, Земсков, 2014; Shardakova et al., 2021).

Сумма РЗЭ в исследуемых цирконах варьируется от 200 до 4500 г/т. Отношение тяжелых РЗЭ к легким меняется от 4 до 124, $(Lu/La)_n$ (нормировано по хондриту) – от 51 до 50 000, Ce/Ce^* – от 1.18 до 507; Eu/Eu^* – от 0.05 до 0.76. Наиболее широкий диапазон величин $(Lu/La)_n$ характерен для цирконов палеопротерозойского возраста (PR_1). Тренды распределения нормированных по хондриту содержаний РЗЭ в большинстве зерен характеризуются резким подъемом от легких к тяжелым элементам. На рис. 8а–д приведены тренды распределения РЗЭ для изученных цирконов разных возрастных групп.

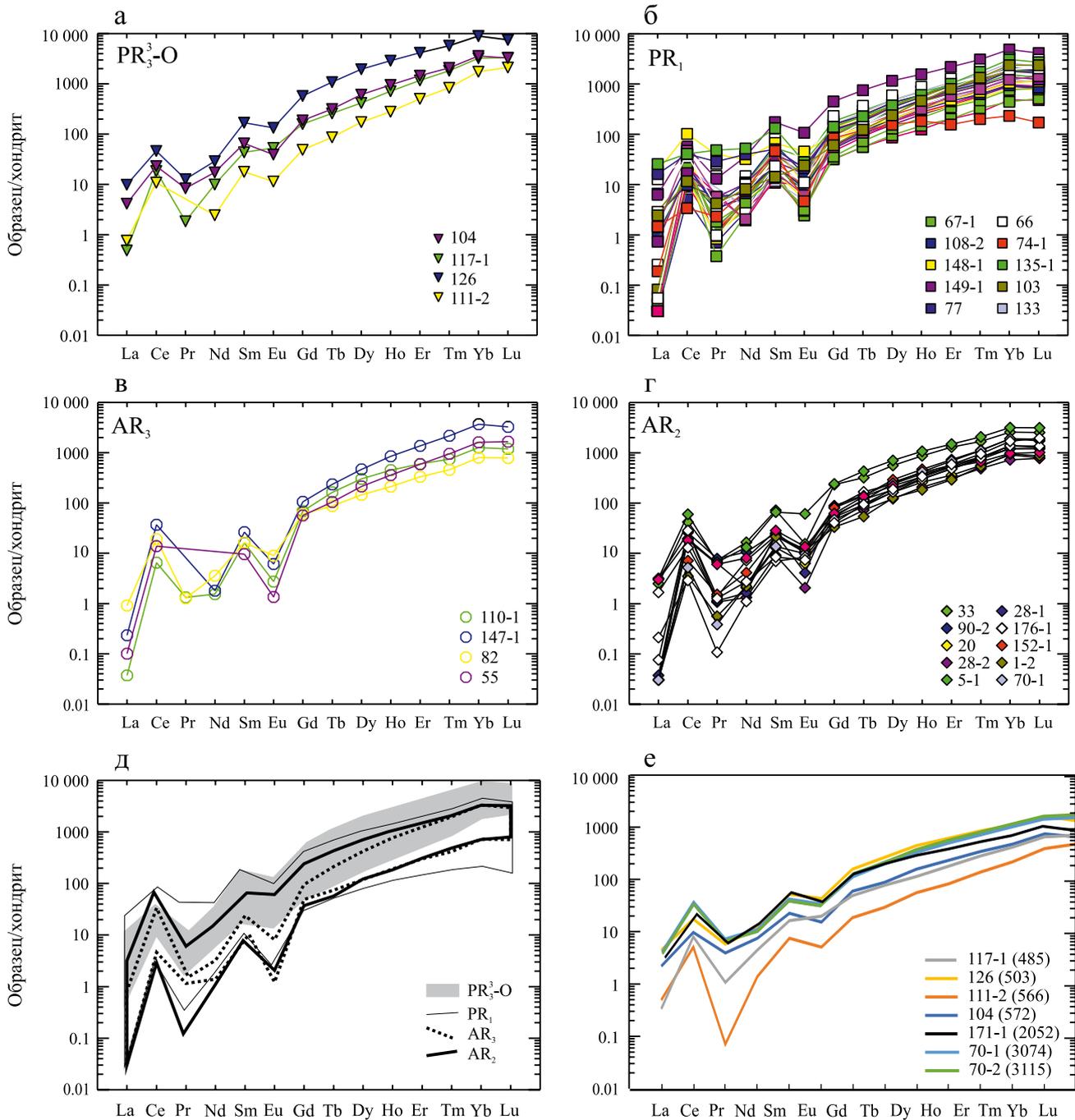


Рис. 8. Хондрит-нормированные тренды (Sun, McDonough, 1989) распределения РЗЭ в детритовых цирконах. а-г – отдельно по возрастным группам; д – сводные поля по всем возрастным группам; е – тренды цирконов, соответствующих “океаническому” типу, по (Grimes et al., 2007).

Fig. 8. Chondrite-normalized (Sun, McDonough, 1989) REE distribution trends in detrital zircon.

а-г – separately in age groups; д – summary fields for all age groups; е – distribution of REE in zircon corresponding to the “oceanic” type according to (Grimes et al., 2007).

Отдельно (рис. 8е) построена диаграмма для цирконов “океанического” типа.

В детритовых цирконах наблюдается широкий разброс концентраций Hf (от 7203 до 16771 г/т) и Y

(от 270 до 5900 г/т). Цирконы эдиакарско-ордовикского возраста характеризуются наиболее высокими содержаниями Y.

Известно, что концентрация титана в цирконе рассматривается как функция температуры образования минерала (Ferry, Watson, 2007). Однако его повышенные содержания (>30 г/т) связывают с сорбцией титана микропорами и трещинами либо дефектами, формирующимися в процессе структурного разупорядочения и гидратации циркона под воздействием радиоактивного распада U (Harrison, Schmit, 2007). В таком случае использовать содержания Ti в цирконе для расчета температур не следует. Поэтому несколько зерен детритового циркона, содержащих 80–100 г/т Ti, исключены из выборки для датирования и анализа геохимии.

Природа и вероятные источники детритового циркона. Геохимические особенности детритовых цирконов широко используются для определения природы и состава источников сноса (Hoskin, Ireland, 2000; Belousova et al., 2002; Hoskin, Schaltegger, 2003; Kaczmarek et al., 2008; Ферштатер и др., 2012; Kostitsyn et al., 2015; Grimes et al., 2015; Kirkland et al., 2015; и др.). В изученной выборке более половины всех зерен циркона по соотношениям La, (Sm/La)_n и Ce/Ce* попадают в поле магматических разностей (М), остальные располагаются в промежуточной области между магматическими и гидротермальными (Н) цирконами (рис. 9). Вероятно, часть цирконов все же подверглась незначительным преобразованиям. Такие цирконы нередко характеризуются пористой структурой (Смолькин и др., 2020; Аранович и др., 2022), которая встречается и в некоторых зернах из изученной выборки. Однако цирконы с “гидротермальными” геохимическими характеристиками могут формироваться и на позднемагматической стадии кристаллизации пород или в связи с их метаморфическими преобразованиями (Hoskin, Schaltegger, 2003).

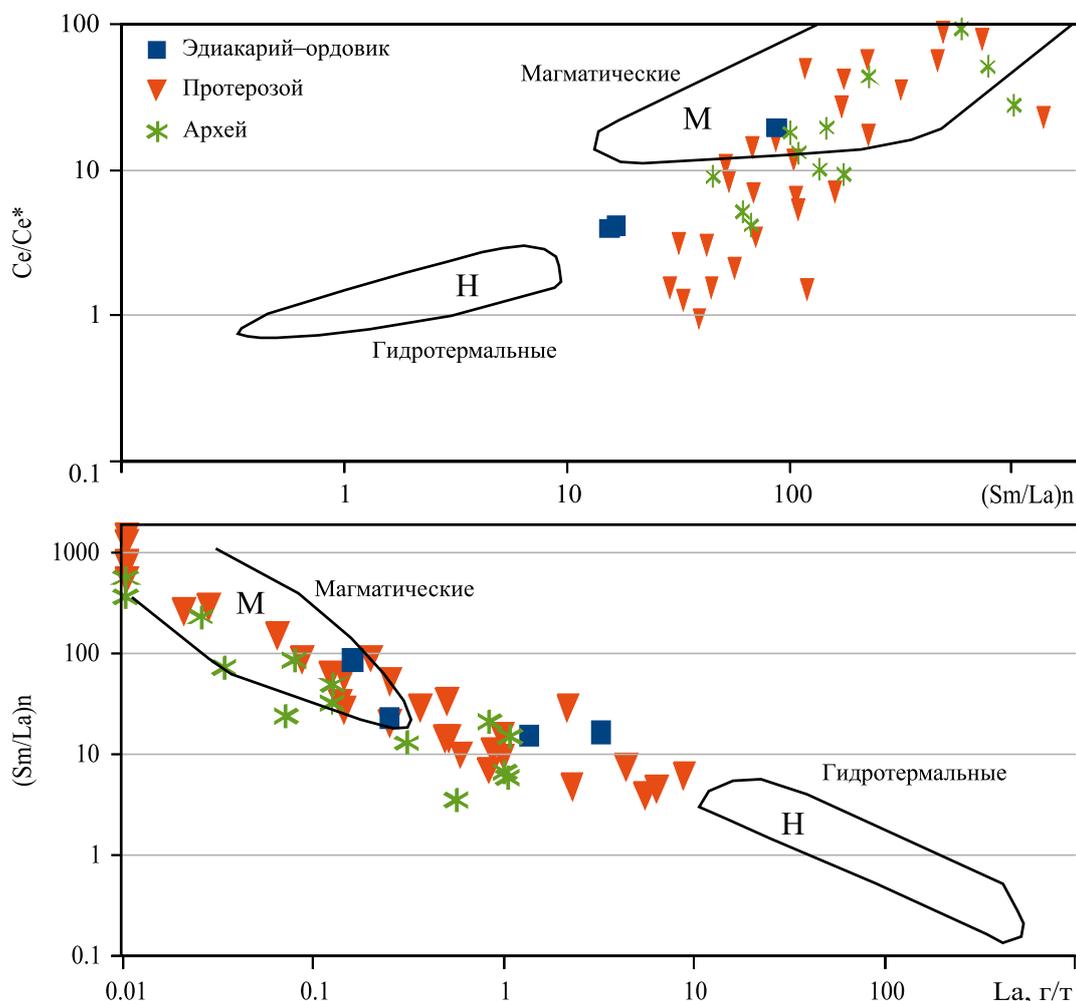


Рис. 9. Диаграммы Ce/Ce*–(Sm/La)_n и (Sm/La)_n–La для составов изученного детритового циркона с полями магматического или гидротермального циркона, по (Hoskin, Schaltegger, 2003).

Fig. 9. Diagrams Ce/Ce*–(Sm/La)_n and (Sm/La)_n–La for studied zircon with fields of magmatic and hydrothermal zircon (Hoskin, Schaltegger, 2003).

Типичные магматические цирконы, как правило, характеризуются сравнительно невысоким содержанием ЛРЗЭ, особенно La, интенсивной положительной аномалией Ce и отрицательной – Eu (Belousova et al., 2002). В изученной выборке существенная часть зерен по геохимическим признакам отвечает магматическому циркону. Устойчиво пониженными суммарными содержаниями РЗЭ обладают цирконы древнее 2900 млн лет (см. табл. 1). В выборке практически нет зерен с пологими трендами распределения РЗЭ, характерными для гидротермально измененных разностей.

Согласно работам (Grimes et al., 2007, 2015), по соотношениям Yb–U и Hf–U/Yb в цирконе можно выделить “континентальный” и “океанический” типы источников. Большинство фигуративных точек изученных детритовых цирконов лежит в “континентальном” поле (рис. 10). Это согласуется с преобладающей кварц-калишпат-биотит-апатитовой минеральной ассоциацией включений в цирконах, также свидетельствующей, что источником большей части архейско-протерозойских цирконов послужили породы континентальной коры. Данное обстоятельство подчеркивает сходство изученных цирконов с цирконами из близких по возрасту пород тараташского и александровского комплексов, для которых по изотопным данным установлена континентальная природа протолита (Ронкин и др., 2012; Сомскова и др., 2022). Это позволяет считать, что небольшой сектор УЬ, в котором находятся клинопироксениты ШС, является близким аналогом комплексов пород Александровского и Тараташского блоков, где залегают сходные ультрамафиты. Тем не менее составы нескольких детритовых цирконов, преимущественно эдиакарского и ордовикского возраста, попадают

в “океаническое” поле. Факт наличия ордовикских цирконов такого типа не противоречит общей геотектонической ситуации, существовавшей на Урале в это время.

Особенности внутренней структуры зерен детритового циркона и характер распределения в них РЗЭ показывают, что значительная часть цирконов имеет магматическое происхождение. Как известно, геохимические особенности акцессорного циркона несут информацию о составе материнских магматических пород, и это показано на большом объеме статистического материала (Belousova et al., 2002). Результаты этих исследований можно использовать и для интерпретации состава пород – источников детритового циркона, хотя сделанные на этой основе выводы всегда будут иметь вероятностное значение. На диаграмму Hf–Y (рис. 11) вынесены точки цирконов, составы которых отвечают магматическому происхождению.

Точки составов преобладающей части циркона всех возрастных групп (AR₃, AR₄, PR₁ и PR₃³–O) лежат в поле источников основного и среднего состава (II – “долериты-базиты” и III – “диориты”). Отдельные точки располагаются в поле “гранитного” источника (см. рис. 11). Сходные результаты для большинства зерен циркона получены и при использовании мультиэлементного “дерева” по методике CART2000 (интервалы концентраций Lu, Hf, Y, U, Yb) (Belousova et al., 2002). Эти прогнозы не противоречат составу егустинской свиты, представленной полосчатой амфиболит-гнейсовой толщей, в поле развития которой отобрана проба на детритовый циркон. Эти метаморфиты секутся дайками гранитов эдиакарского битимского и сиенитов ордовикского козлингорского комплексов (Белковский, 2011; Белковский и др., 2018; Шардакова, Чер-

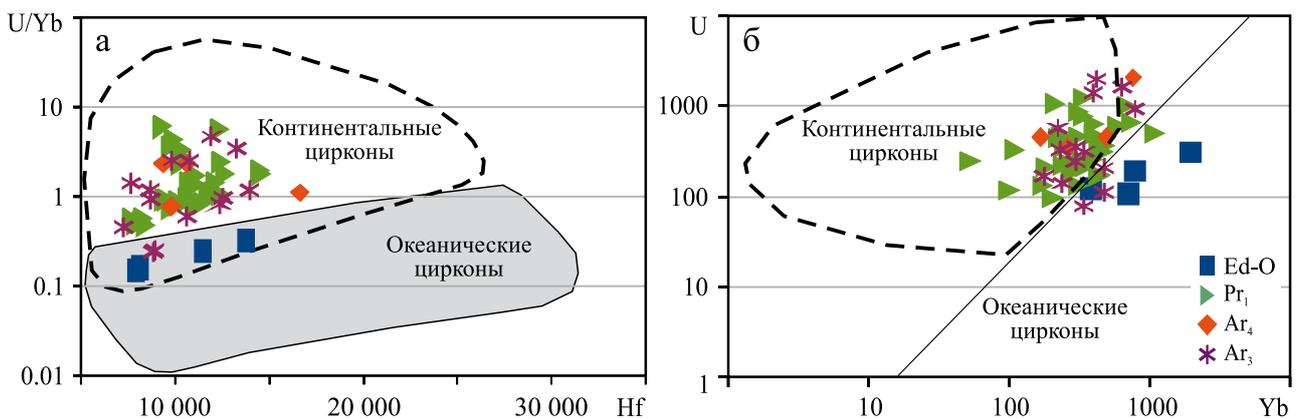


Рис. 10. Диаграммы U/Yb–Hf (а) и U–Yb (б) для состава циркона.

Поля для циркона из континентального и океанического типов источника, по (Grimes et al., 2007). Ed – эдиакарий.

Fig. 10. Diagrams U/Yb–Hf (a) and U–Yb (б) for zircon.

Fields – zircon from continental and oceanic types of substrates (Grimes et al., 2007). Ed – Ediacarian.

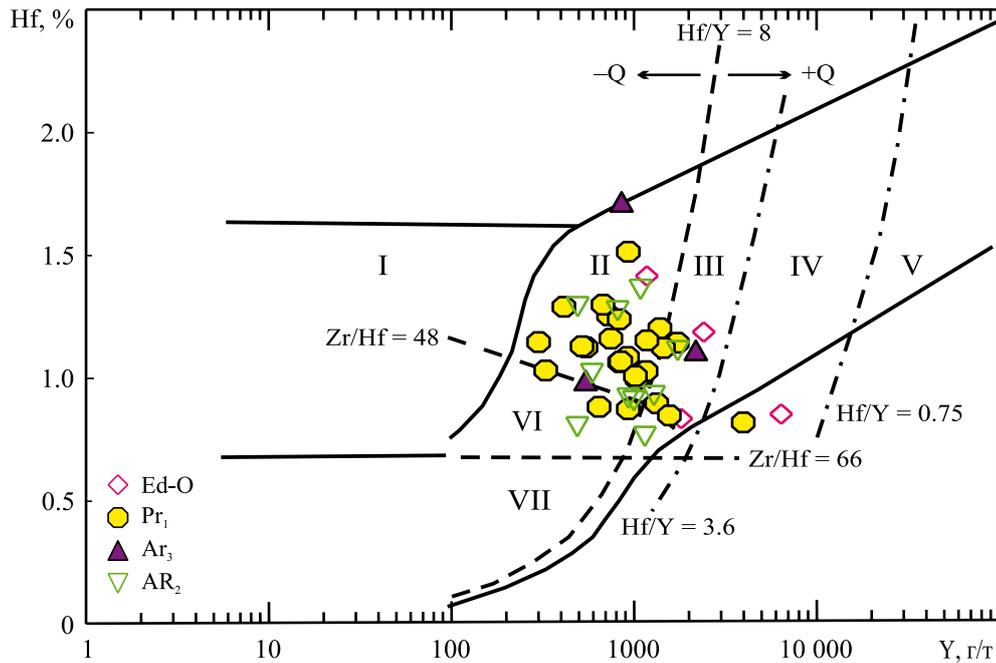


Рис. 11. Диаграмма Hf–Y для детритового циркона (Belousova et al., 2002).

Поля составов источников: I – кимберлиты, II – породы ультраосновного, основного и промежуточного состава (“дolerиты и базиты”), III – кварц-полевошпатовые породы среднего состава (“диориты”), IV – фельзические (кварц-полевошпатовые) породы с высоким содержанием SiO₂ (“граниты”), V – грейзены, VI – щелочные породы и щелочные метасоматиты (“сиениты/монзониты”), VII – карбонатиты. Ed – эдиакарий.

Fig. 11. Hf–Y diagram for detrital zircons (Belousova et al., 2002).

The fields of the source compositions are: I – kimberlites, II – rocks of ultrabasic, basic and intermediate composition (“dolerites and basites”), III – quartz-feldspar rocks of medium composition (“diorites”), IV – felsic (quartz-feldspar) rocks with a high SiO₂ content (“granites”), V – greisen, VI – alkaline rocks and alkaline metasomatites (“syenites/monzonites”), VII – carbonatites. Ed – Ediacarian.

вяковская, 2020; Шардакова и др., 2022). В условиях плохой обнаженности западной части УБ можно предполагать, что среди развитых здесь метаморфитов присутствуют реликтовые блоки или фрагменты AR-PR-образований. Для сопоставления состава детритового циркона с цирконами из магматических и метаморфических пород УБ и расположенных юго-западнее тараташского и александровского комплексов можно использовать соотношения в породах U и Th (рис. 12). Обращает на себя внимание сходство поведения этих элементов в главной (PR₁) популяции детритового циркона УБ с таковым в цирконе из гранулитов тараташского комплекса и существенное отличие от цирконов из мигматизированных афиболитов восточного фланга Тараташского блока, шигирских пироксенитов и амфиболитов егустинской свиты. Отметим, что для самой молодой (V-O) популяции изученных детритовых цирконов соотношения U–Th и датировки практически аналогичны таковым для цирконов из сиенитов ордовикского козлиногорского комплекса.

Учитывая сходство геохимии и преобладание протерозойских датировок (2100–2000 млн лет)

цирконов в Уфалейском и Тараташском блоках, можно предполагать сходный сценарий геологического развития этих структур на раннем, докембрийском, этапе, после которого строение Уфалейского блока было сильно изменено в результате проявлений тектонотермальных событий позднепалеозойского возраста в связи с формированием зоны Главного Уральского разлома и неоднократным внедрением гранитоидных интрузий.

Представления о докембрийском возрасте образований Уфалейского блока. На геологических картах нового поколения (Государственная... 2021) возраст егустинской и слюдяногорской свит в западной и центральной частях Уфалейского блока принят за протерозойский. И эти представления много десятилетий основывались на Rb–Rb изотопном возрасте иттроэпидота (Минеев, 1959; Овчинников и др., 1964) из пегматитов, нескольких опубликованных K–Ar и U–Pb датировках, не подкрепленных цифровым аналитическим материалом (Краснобаев и др., 1998; Белковский, 2011) и оценках высокого уровня метаморфизма и степени деформаций гнейсов и амфиболитов (Кейльман, 1974).

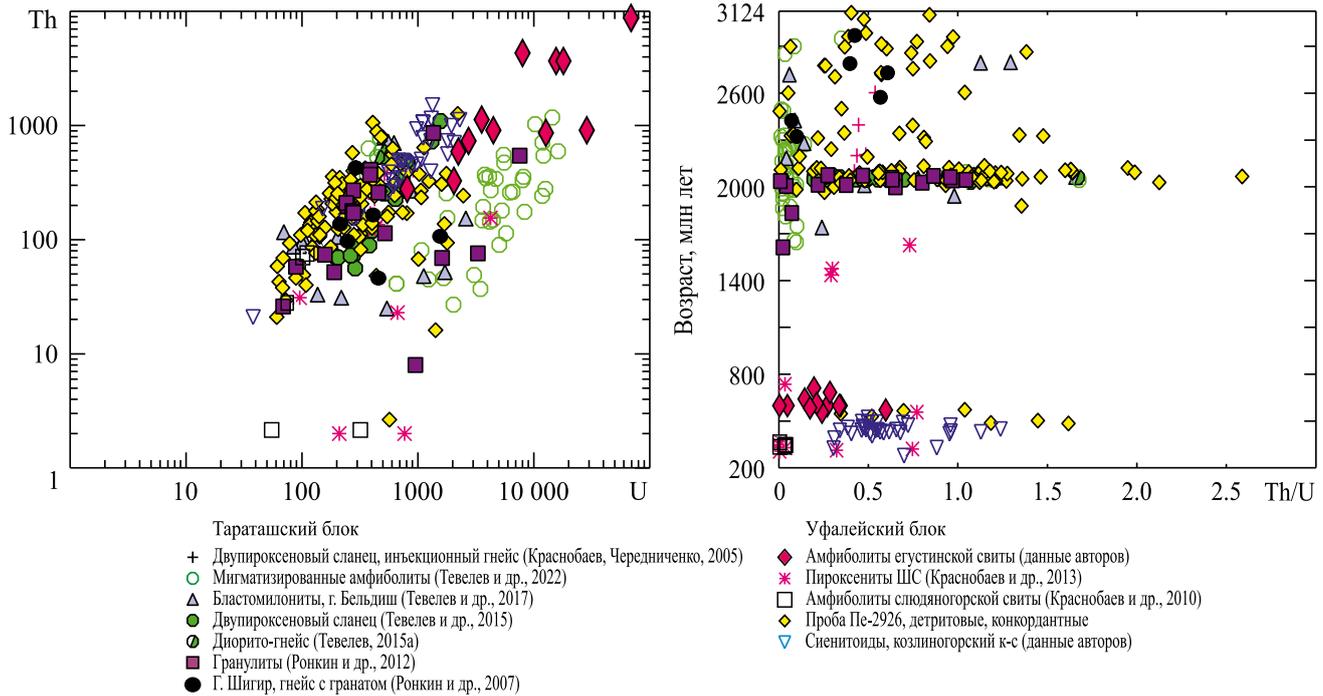


Рис. 12. Диаграммы U–Th, Th/U–возраст (млн лет) для изучаемых детритовых цирконов в сравнении с цирконами из метаморфических и магматических пород Уфалейского и Тараташского блоков.

Fig. 12. U–Th and Th/U–Age (Ma) diagrams for studied detrital zircons in comparison with zircons from metamorphic and igneous rocks of the Ufaley and Taratash blocks.

Возрастные определения для пород УБ, появившиеся в последние 10–15 лет и заслуживающие обсуждения, укладываются в интервал от кембрия до позднего палеозоя и раннего триаса (Hetzl, Romer, 1999; Hetzel, Glodny, 2002; Краснобаев и др., 2010; Белковский, 2011; Шардакова, 2016а). Несомненно, комплексы УБ испытали глубокие преобразования, связанные с тектоническими деформациями, сопутствующими формированию зоны Главного Уральского разлома, которую подстилают породы восточного края УБ (Echtler et al., 1997; Hetzel, Glodny, 2002). По-видимому, термальное воздействие на породы УБ и их изотопные системы оказали и позднепалеозойские гранитоидные интрузии (Hetzl, Romer, 1999; Шардакова и др., 2015, 2016а). Косвенным свидетельством вероятного существования в УБ блоке докембрийских образований стали датировки гранитоидов битимского комплекса – 579 млн лет (Шардакова, Червяковская, 2020; Государственная..., 2021), прорывающих амфиболиты и гнейсы слюдяногорской свиты в центральной части блока. До настоящего времени единственным достоверным определением протерозойского возраста в породах УБ являются данные по цирконам из пироксенитов ШС, залегающих среди амфиболит-гнейсовой толщи егустинской свиты на западе УБ. По данным А.А. Краснобаева с соавторами (2013), возраст ядра одного из зерен составля-

ет 1651 млн лет, а конкордантный возраст еще двух цирконов – 1444 млн лет. Результаты этого исследования не согласуются с ранее опубликованными данными о возможном кембрийском возрасте метаморфических пород УБ, вмещающих ультрамафиты (Краснобаев и др., 2010), что усилило наш интерес к изучению детритового циркона.

Проведенное изучение детритового циркона из четвертичных глинисто-гравийных отложений западной части УБ показало доминирование в пробе палеопротерозойских цирконов с датировками 2100–2000 млн лет с небольшой долей цирконов архейского и эдиакарско-раннеордовикского возраста при полном отсутствии зерен с датировками в интервале 1800–800 млн лет. Структура, состав и геохимические характеристики цирконов “протерозойского максимума” частично отражают континентальную природу протолита и соответствуют цирконам Тараташского и Александровского блоков, расположенных юго-западнее и представляющих собой выступы кристаллического щита Восточно-Европейской платформы.

Анализ комплекса признаков детритового циркона из отложений УБ позволяет предполагать сходство состава протолита и в целом докембрийской истории геологического развития Уфалейского, Тараташского и Александровского блоков, сближенных в структуре современного Уральско-

го орогена. Эта гипотеза допускает также разновозрастность и генетическое родство пироксенитов и израндитов Уфалейского и Александровского блоков, формирование которых, по всей видимости, происходило в палеопротерозое на краю Восточно-Европейской платформы.

ВЫВОДЫ

Для решения проблемы возраста и оценки геотектонических условий формирования высокоизвестковистых ультрамафитов и окружающих их метаморфических пород егустинской свиты в западной части Уфалейского блока выполнено U-Pb датирование и изучение геохимических особенностей обломочного циркона из четвертичных глинисто-гравийных отложений у подножия Шигирских сопков. Из группы цирконов с конкордантными значениями возраста 76% приходится на палеопротерозой (пик на гистограмме возрастов, 2100–2000 млн лет), 12% – на мезоархей, по 6% – на неоархей и интервал поздний неопротерозой(эдиакарий)–ордовик.

В выборке цирконов, представляющей все возрастные группы, для оценки состава и природы предполагаемых типов материнских пород методом LA-ICP-MS выполнено около 50 определений концентраций редких и редкоземельных элементов. Комплексный анализ внутреннего строения, зональности и геохимических характеристик обломочных цирконов показывает, что большая их часть соответствует магматическому генезису. Доминирующая в последних кварц-калишпат-биотит-апатитовая ассоциация минералов-узников и соотношения таких индикаторных элементов, как U, Yb, Y, Hf, являются показателями “континентального” типа субстрата, из которого был вынесен циркон. По другим геохимическим критериям материнскими породами могли служить базиты, диориты и граниты, что не противоречит составу метаморфических и ортомагматических пород, развитых в западной части Уфалейского блока.

Архейско-протерозойский возраст, “континентальная” природа и предполагаемый состав источников детритового циркона УБ сближают его с цирконами из пород Тараташского блока, что может служить аргументом в пользу сходства палеогеодинамической истории Тараташского и западной части Уфалейского блоков. Редкий детритовый циркон молодой популяции по особенностям строения, возрасту и геохимии близок к таковым из гранитоидов битимского и сиенитов козлинского комплексов, секущих породы егустинской свиты в обрамлении ШС.

Морфология, крупный размер и относительно низкая степень окатанности изученного детритового циркона свидетельствуют о его незначительном переносе и, как следствие, преобладании местных

источников сноса. Это дает основание предполагать присутствие в метаморфической толще западной части Уфалейского блока, где на поверхность выведены пироксениты Шигирских сопков, фрагментов докембрийских комплексов “тараташского” типа и подтверждает предположение, что западная часть УБ, отделенная от центральной и восточной разрывными нарушениями, является, как Тараташский и Александровский блоки, фрагментом архейского протократона Волго-Уралья (Kuznetsov et al., 2017; Романюк и др., 2018). Впоследствии, войдя в состав палеопротерозойского орогена, они могли развиваться совместно. Следы такого единства, по-видимому, были стерты в палеозое в результате вовлечения Уфалейского блока в процессы, связанные с формированием Уральского подвижного пояса, структуры Главного Уральского разлома и проявлений активного палеозойского магматизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Борисов А.А. (2022) Океанический циркон как петрогенетический индикатор. *Геология и геофизика*, **63**(4), 522-549. <https://doi.org/10.15372/GiG2019187>
- Арзамасцев Ф.А., Арзамасцева Л.В., Травин А.В., Беляцкий Б.В., Шаматрина А.М., Антонов А.В., Ларионов А.Н., Родионов Н.В., Сергеев С.А. (2007) Длительность формирования палеозойской магматической системы в центральной части Кольского полуострова: U–Pb, Rb–Sr, Ar–Ar данные. *Докл. РАН*, **413**(5), 666-670. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07030257>
- Балашов Ю.А., Скублов С.Г. (2011) Контрастность геохимии магматических и вторичных цирконов. *Геохимия*, (6), 622-633. <https://doi.org/10.1134/S0016702911040033>
- Белковский А.И. (1987) Биотиты и вермикулиты уфалейского гнейсо-мигматитового комплекса (Средний Урал). Свердловск: УрО АН СССР, 59 с.
- Белковский А.И. (2011) Геология и минералогия кварцевых жил Кыштымского месторождения (Средний Урал). Миасс: ИМИН УрО РАН, 234 с.
- Белковский А.И. (1989) Симплектит-эколиты Среднего Урала. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 190 с.
- Белковский А.И., Шардакова Г.Ю., Холоднов В.В., Удачин В.Н., Коновалова Е.В. (2018) Новые данные по минералогии и петрогеохимии щелочных пород козлинского комплекса. *Вестн. Перм. ун-та. Геология*, **17**(4), 308-325. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.4.308>
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. (2021) Изд. второе. Сер. Южно-Уральская. Л. N-41-I (Кыштым). Объяснит. зап. Минприроды России, Роснедра, Челябинск-недра, ОАО “Челябинскгеосъемка”. М.: Моск. фил. ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 181 с.
- Гребенников А.В., Ханчук А.И. (2021) Геодинамика и магматизм трансформных окраин тихоокеанского типа: основные теоретические аспекты и дискриминантные диаграммы. *Тихоокеан. геол.*, **40**(1), 3-24. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-1-3-24>
- Григорьев Н.А. (2009) Распределение химических эле-

- ментов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 381 с.
- Григорьев Н.А. (2005) Циркон как носитель циркония и гафния в верхней части континентальной коры. *Литосфера*, (1), 143-149.
- Иванов К.С. (1998) Основные черты геологической истории (1.6–0.2 млрд лет) и строения Урала. Докт. дисс. в форме научн. докл. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 388 с.
- Каулина Т.В. (2010) Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты, 144 с.
- Кейльман Г.А. (1974) Мигматитовые комплексы подвижных поясов. М.: Недра, 196 с.
- Кожевников В.Н., Земсков В.А. (2014) Гидротермальные цирконы из рудных амфиболитов массива Травяная Губа, Северная Карелия. *Тр. Карельск. НЦ РАН*, (1), 76-89.
- Кожевников В.Н., Скублов С.Г., Марин Ю.Б., Медведев П.В., Сыстра Ю., Валенсия В. (2010) Хадей-архейские детритовые цирконы из ятулийских кварцитов и конгломератов Карельского кратона. *Докл. РАН*, **431**(1), 85-90.
- Коротеев В.А., Огородников В.Н., Ронкин Ю.Л., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2009) Полигенность и полихронность пегматитов гнейсово-амфиболитовых комплексов как результат прерывисто-непрерывного развития шовных зон (на примере Уфалейского метаморфического блока, Средний Урал). *Докл. РАН*, **429**(4), 513-517
- Краснобаев А.А. (1986) Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 145 с.
- Краснобаев А.А., Нечухин В.М., Соколов В.Б. (1998) Цирконовая геохронология и проблема террейнов Уральской аккреционно-складчатой системы. *Урал. минералог. сб.* Миасс: УрО РАН, (8), 196-206.
- Краснобаев А.А., Пучков В.Н., Бушарина С.В., Козлов В.И., Пресняков С.Л. (2011) Цирконология израндитов (Южный Урал). *Докл. РАН*, **439**(3), 394-398.
- Краснобаев А.А., Пушкарев Е.В., Бушарина С.В., Готтман И.А. (2013) Цирконология клинопироксенов Шигирских сопков (Уфалейский комплекс, Южный Урал). *Докл. РАН*, **450**(5), 586-591. <https://doi.org/10.7868/S0869565213170192>
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Бушарина С.В., Чередниченко Н.В., Давыдов В.А. (2010) Состав, цирконы и цирконовая геохронология метаморфитов уфалейского комплекса. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 157, 273-279.
- Краснобаев А.А., Чередниченко Н.В. (2005) Цирконовый Архей Урала. *Докл. РАН*, **400**(4), 510-514.
- Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Романюк Т.В., Крупенин М.Т., Горожанин В.М., Горожанин Е.М., Серегина Е.С., Цельмович В.А. (2013) Первые результаты U–Pb LA–ICP–MS-изотопного датирования обломочных цирконов из базальных уровней стратотипа рифея. *Докл. РАН*, **451**(3), 308-313. <https://doi.org/10.7868/S0869565213210226>
- Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О.В., Герцева М.В. (2005) Доордовикские гранитоиды Тимано-Уральского региона и эволюция протоуралид-тиманид. Сыктывкар: Геопринт, 100 с.
- Маслов А.В., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Лепихина О.П. (2004) Нижнерифейские тонкозернистые алюмосиликокластические осадочные образования Башкирского мегантиклинория на Южном Урале: состав и эволюция источников сноса. *Геохимия*, (6), 648-669.
- Минеев Д.А. (1959) Редкоземельный эпидот из пегматитов Среднего Урала. *ДАН СССР*, **127**(4), 865-868.
- Недосекова И.Л., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Савичев А.Н. (2016) Гранитные пегматиты, карбонаты и гидротермалиты Уфалейского метаморфического комплекса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 283 с.
- Овчинников Л.Н., Дунаев В.А., Краснобаев А.А. (1964) Материалы к абсолютной геохронологии Урала. *Абсолютный возраст геологических формаций*. М.: Наука, 157-171.
- Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Недосекова И.Л., Савичев А.Н. (2016) Гранитные пегматиты, карбонаты и гидротермалиты Уфалейского метаморфического комплекса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН; УГГУ, 273 с.
- Отчет о результатах работ по объекту: “Выполнение работ по оценке геологической и геофизической изученности и подготовке материалов по геологическому обоснованию проведения ГДП-200 листа О-40-XXXVI (Нязепетровская площадь)”. (2020) ООО “Геопоиск”, 280 с.
- Петров Г.А., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л. (2005) Допалеозойские магматические комплексы Кваркушко-Каменногорского антиклинория (Средний Урал): новые данные по геохимии и геодинамике. *Литосфера*, (4), 42-69.
- Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Гердес А., Маслов А.В. (2015) Первые результаты U–Pb (LA–ICP–MS) датирования обломочных цирконов из метапесчаников Ишеримского антиклинория (Северный Урал). *Докл. РАН*, **464**(5), 589-601. <https://doi.org/10.7868/S086956521529023X>
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: Даурия, 280 с.
- Пучков В.Н. (2018) Плюм-зависимый гранит-риолитовый магматизм. *Литосфера*, **18**(5), 692-705. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-692-705>
- Пушкарев Е.В., Рязанцев А.В., Готтман И.А., Дегтярев К.Е., Каменецкий В.С. (2018) Анкармиты – новый тип магнезиальных, высококальциевых примитивных расплавов в Магнитогорской островодужной зоне на Южном Урале. *Докл. РАН*, **479**(4), 433-437. <https://doi.org/10.7868/S0869565218100171>
- Пыстин А.М., Гракова О.В., Пыстина Ю.И., Кушманова Е.В., Попвасев К.С., Потапов И.Л., Хубанов В.Б. (2022) U–Pb (LA–SF–ICP–MS) возраст и вероятные источники сноса детритовых цирконов из терригенных отложений верхнего докембрия Приполярного Урала. *Литосфера*, **22**(6), 741-760.
- Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. (2015) Архейско-палеопротерозойская история метаморфизма пород уральского сегмента земной коры. Геология докембрия. *Тр. Карельск. НЦ РАН*, (7), 3-18.
- Пыстин А.М., Пыстина С.Н., Ленных В.И. (1976) Изменения химического и минерального состава габброидов при метаморфизме (западный склон Южного Урала). *Щелочные, основные и ультраосновные комплексы Урала*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 41-54.
- Пыстин А.М., Ронкин Ю.Л., Синдерн С., Пыстина Ю.И.

- (2012) Геохронологическая история метаморфизма пород дорифейских образований западного склона Южного Урала. *Вестн. Ин-та геол. Коми НЦ УрО РАН*, **11**(215), 2-8.
- Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н. (2018) Палеотектонические и палеогеографические обстановки накопления нижнерифейской айской свиты Башкирского поднятия (Южный Урал) на основе изучения детритовых цирконов методом “TerraneChrono®”. *Геодинамика и тектонофизика*, **9**(1), 1-37. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0335>.
- Ронкин Ю.Л., Синдерн С., Лепихина О.П. (2012) Изотопная геология древнейших образований Южного Урала. *Литосфера*, (5), 50-76.
- Ронкин Ю.Л., Синдерн С., Маслов А.В., Матуков Д.И., Крамм У., Лепихина О.П. (2007) Древнейшие (3.5 млрд лет) цирконы Урала; U-Pb (SHRIMP-II) и T_{DM} -ограничения. *Докл. РАН*, **415**(5), 651-657.
- Русин А.И. (2007) Высокобарический метаморфизм Урала. *Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 421-460.
- Русин А.И., Краснобаев А.А. (1984) Древнейшая кора и проблема серых гнейсов на Урале. *Природные ассоциации серых гнейсов архея (геология и петрология)*. Л.: Наука, 94-104.
- Сергеева Л.Ю., Гусев Н.И., Скублов С.Г., Ли С.-Х., Ли Ч.-Л. (2020) Палеоархейский детритовый циркон из кварцитов далдунской серии (Анабарский щит): геохимия, изотопный состав кислорода и возраст. *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. XI Всерос. молодежн. науч. конф. Екатеринбург, 260-261.
- Синдерн С., Ронкин Ю.Л., Хетцель Р., Шульте Б.А., Крамм У., Маслов А.В., Лепихина О.П., Попова О.Ю. (2006) Тараташский и александровский метаморфические комплексы (Южный Урал): Р-Т ограничения. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 154, 322-330.
- Слабунов А.И., Нестерова Н.С., Егоров А.В., Кулешевич Л.В., Кевлич В.И. (2021) Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита. *Геохимия*, **66**(4), 291-307. <https://doi.org/10.31857/S0016752521040063>
- Смолькин В.Ф., Скублов С.Г., Ветрин В.Р. (2020) Редкоэлементный состав детритового циркона архейского возраста из ятулийских терригенных пород Фенноскандии. *Зап. РМО*, **CXLIX**(6), 85-100. <https://doi.org/10.31857/S086960552006012X>
- Соболева А.А., Андреичев В.Л., Бурцев И.Н., Никулова Н.Ю., Хубанов В.Б., Соболев И.Д. (2019) Детритовые цирконы из верхнедокембрийских пород выемской серии Среднего Тимана: U-Pb возраст и источники сноса. *Бюлл. МОИП. Отд. Геол.*, **94**(1), 3-16.
- Сомсикова А.В., Аносова М.О., Федотова А.А., Фугзан М.М., Кириозова Т.И., Тевелев А.В., Астраханцев О.В. (2022) Изотопно-геохимические особенности мигматитов тараташского метаморфического комплекса (Южный Урал). *Геохимия*, **67**(10), 903-920. <https://doi.org/10.31857/S0016752522100107>
- Тевелев А.В., Кошелева И.А., Тевелев А.В., Хотылев А.О., Мосейчук В.М., Петров В.И. (2015) Новые данные об изотопном возрасте тараташского и александровского метаморфических комплексов. *Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология*, (1), 27-42.
- Ферштатер Г.Б. (2013) Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 368 с.
- Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Беа Ф., Монтеро П. (2012) Геохимия циркона из магматических и метаморфических пород Урала. *Литосфера*, (4), 13-29.
- Червяковская М.В., Червяковский В.С., Вотяков С.Л. (2023) ЛА-ИСП-МС определение микропримесного и U-Pb изотопного состава циркона: методические аспекты анализа “из одного кратера”. *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. XIII Всерос. молодежн. науч. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 300-302.
- Шардакова Г.Ю. (2016а) Геохимические особенности и изотопный возраст гранитоидов Башкирского мегантиклинория – свидетельства импульсов эндогенной активности в зоне сочленения Уральского орогена с Восточно-Европейской платформой. *Геохимия*, (7), 607-622. <https://doi.org/10.7868/S0016752516070098>
- Шардакова Г.Ю. (2016б) Гранитоиды Уфалейского блока: геодинамические обстановки, возраст, источники, проблемы. *Литосфера*, (4), 133-137.
- Шардакова Г.Ю., Белковский А.И., Леонова Л.В. (2022) Акцессорная минерализация докембрийских амфиболитов и сопряженных с ними кислых пород козлинского редкометалльного проявления (Уфалейский блок, Средний Урал). *Современные направления развития геохимии*. Мат-лы конф. Иркутск: ИГСО РАН, 229-233.
- Шардакова Г.Ю., Савельев В.П., Пужаков Б.А., Петров В.И. (2015) Новые данные о химическом составе и возрасте пород козлинского комплекса. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 162, 148-154.
- Шардакова Г.Ю., Червяковская М.В. (2020) Вендзембрийские гранитоиды Уфалейского блока (Средний Урал): новые изотопные данные, состав субстрата, потенциальная рудоносность. *Изв. УГГУ*, **58**(2), 48-63. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-48-63>
- Andersen T. (2005) Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chem. Geol.*, **216**(3-4), 249-270. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.11.013>.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 602-622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Bibikova E.V., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., Bogdanova S.V., Postnikov A.V., Popova L.P., Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L., Fan J.-X. (2013) The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, **36**, 199-204. <http://dx.doi.org/10.18814/epiugs/2013/v36i3/002>
- Echtler H.P., Ivanov K.S., Ronkin Y.L., Karsten L.A., Hertz R., Noskov A.G. (1997) The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal. *Tectonophysics*, **276**(1-4), 229-251.
- Ferry J.M., Watson E.B. (2007) New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **154**, 429-437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
- Fu B., Mernagh T.P., Kita N.T., Kemp A.I.S., Valley J.W. (2009) Distinguishing magmatic zircon from hydrother-

- mal zircon: a case study from the Gidginbung high-sulphidation Au–Ag–(Cu) deposit, SE Australia. *Chem. Geol.*, **259**, 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.035>
- Glushchenko V.V. (2009) Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids. *Stratigr. Geol. Correl.*, **17**(6), 561-573. <http://dx.doi.org/10.1134/S086959380906001X>
- Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B., Mazdab F.K., Wooden J.L., Cheadle M.J., Hanghoj K., Schwartz J.J. (2007) Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, **35**, 643-646. <https://doi.org/10.1130/G23603A>
- Grimes C.B., Wooden J.L., Cheadle M.J., John B.E. (2015) "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **170**(5-6), article 46. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1199-3>
- Harley S.L., Kelly N.M. (2007) Zircon tiny but timely. *Elements*, **3**(1), 13-18.
- Harrison T.M., Schmitt A.K. (2007) High sensitivity mapping of Ti distributions in Hadean zircons. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **261**, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.016>
- Hetzel R., Glodny J. (2002) A crustal-scale, orogen-parallel strike-slip fault in the Middle Urals: age, magnitude of displacement, and geodynamic significance. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, **9**(9), 231-245.
- Hetzel R., Romer R.L. (1999) U–Pb dating of the Verkniy Ufaley intrusion, middle Urals, Russia: a minimum age for subduction and amphibolite facies overprint of the East European continental margin. *Geol. Mag.*, **136**(5), 593-597.
- Hoskin P.W.O. (2005) Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(3), 637-648.
- Hoskin P.W.O., Ireland T.R. (2000) Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, **28**, 627-630. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<627:REECOZ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<627:REECOZ>2.0.CO;2)
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Zircon. Rev. Mineral. Geochem.*, **53**, 7-62. <http://dx.doi.org/10.2113/0530027>
- Hu Z.L., Wang X.W., Qin Z.P., Zhang J., Gao Y., Peng H. (2012) Basic Characteristics of Zircon Trace Elements and Their Genetic Significances in Jiama Copper Polymetallic Deposit. *Nonferrous Metals (Min. Sect.)*, **64**, 58-63.
- Hu P., Zhai Q., Cawood P.A., Weinberg R.F., Zhao G., Zhou R., Tang Y., Liua Y. (2024) Detrital zircon REE and tectonic settings. *Lithos*, **480-481**, 107661. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107661>
- Kaczmarek M.A., Müntener O., Rubatto D. (2008) Trace element chemistry and U–Pb dating of zircons from oceanic gabbros and their relationship with whole rock composition (Lanzo, Italian Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **155**(3), 295-312. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0243-3>
- Kholodnov V.V., Shardakova G.Yu., Fershtater G.B., Shagolov E.S. (2018) The Riphean Magmatism Preceding the Opening of Uralian Paleocean: Geochemistry, Isotopes, Age, and Geodynamic Implications. *Geodynam. Tectonophys.*, **9**(2), 365-389. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0351>
- Kirkland C.L., Smithies R.H., Taylor R.J.M., Evans N., McDonald B. (2015) Zircon Th/U ratios in magmatic environs. *Lithos*, **212-215**, 397-414. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.11.021>
- 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. *Geochem. Int.*, **53**(9), 759-785. <https://doi.org/10.1134/S0016702915090025>
- Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Romanyuk T.V., Degtyarev K.E., Maslov A.V., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N., Pyzhova E.S. (2017) The first results of U/Pb dating detrital zircons from sandstones of zigalga Formation (Middle Riphean, the South Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **475**(2), 863-867. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17080-244>
- Li H., Watanabe K., Yonezu K. (2014) Zircon Morphology, Geochronology and Trace Element Geochemistry of the Granites from the Huangshaping Polymetallic Deposit, South China: Implications for the Magmatic Evolution and Mineralization Processes. *Ore Geol. Rev.*, **60**, 14-35. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.009>
- Linnemann U., Ouzegane K., Drareni A., Hofmann M., Becker S., Gärtner A., Sagawe A. (2011) Sands of West Gondwana: an archive of secular magmatism and plate interactions – a case study from the Cambro-Ordovician section of the Tassili Ouan Ahaggar (Algerian Sahara) using U–Pb–LA–ICP–MS detrital zircon ages. *Lithos*, **123**(1-4), 188-203. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.01.010>
- Maslov A.V. (2004) Riphean and Vendian sedimentary sequences of the Timanides and Uralides, the eastern periphery of the East European Craton. The Neoproterozoic Timanide orogen of Eastern Baltica. *Geol. Soc., Lond., Memoirs*, **30**, 19-35. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.03>
- Nosova A.A., Kargin A.V., Larionova Yu.O., Sazonova L.V., Gorozhanin V.M., Kovalev S.G. (2012) Mesoproterozoic within-plate province of the Western Urals: main petrogenetic rock types and their origin. *Petrology*, **20**(4), 356-390. <https://doi.org/10.1134/S086959111204008X>
- Pearce J.A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, **100**(1), 14-48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. (2021) LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record. *Lithos*, **392-393**(106068), 392-393. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106068>
- Pelletier E., Cheilletz A., Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., Hakour A.E., Deloule E., Feraud G. (2007) Hydrothermal zircons: A tool for ion microprobe U–Pb dating of gold mineralization (Tamlalt-Menhouhou gold deposit – Morocco). *Chem. Geol.*, **245**, 135-161. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.07.026>
- Romanyuk T.V., Kuznetsov N.B., Novikova A.S., Latysheva I.V., Feduykin I.V., Dubenskiy A.S., Erofeeva K.G., Sheshukov V.S. (2024) Magmatites of the Kastel Mountain as a Local Source of Detrital Zircons for the Demerdzhi Formation (Southern Demerdzhi Mountain),

- Mountainous Crimea. *Geodynam. Tectonophys.*, **15**(6), 0794. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-6-0794>
- Savva E.V., Belyatsky B.V., Antonov A.V. (2010) Carbonatic zircon. *Acta Mineralogica-Petrographica*. Abstr. ser., **6**, 576.
- Scherer E.E., Whitehouse M.J., Münker C. (2007) Zircon as a Monitor of Crustal Growth. *Elements*, **3**(1), 19-24. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.3.1.19>
- Schwartz T.M., Surpless K.D., Colgan J.P., Johnstone S.A., Holm-Denoma C.S. (2021) Detrital zircon record of magmatism and sediment dispersal across the North American Cordilleran arc system (28–48 N). *Earth-Sci. Rev.*, **220**, 103734. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103734>
- Shardakova G.Yu., Pribavkin S.V., Krasnobaev A.A., Borodina N.S., Chervyakovskaya M.V. (2021) Zircons from rocks of the Murzinka-Adui metamorphic complex: geochemistry, thermometry, polychronism, and genetic consequences. *Geodynam. Tectonophys.*, **12**(2), 332-349. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0527>
- Shardakova G.Yu., Pushkarev E.V., Kotov A.B., Simankova O.A. (2024) Evidence of the Early Precambrian Age of Metamorphic Rocks from the Ufaley Block (Middle Urals): Results of U–Th–Pb (LA-ICP-MS) Dating of Detrital Zircon from the Quaternary Deposits. *Dokl. Earth Sci.*, **519**(2), 2017-2022. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X24604073>
- Sircombe K.N., Bleeker W., Stern R. (2001) Archaean provenance: a systematic detrital zircon investigation of supracrustals in the Slave craton, Canada. Proc. Fourth Intern. Archaean Symp. Ext. Abstracts. *AGSO-Geosci. Australia Record*, **37**, 263-265.
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: magmatism in the ocean basins. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **42**, 313-346.
- Szczepański J., Turniak K., Anczkiewicz R., Gleichner P. (2020) Dating of detrital zircons and tracing the provenance of quartzites from the Bystrzyckie Mts: implications for the tectonic setting of the Early Palaeozoic sedimentary basin developed on the Gondwana margin. *Int. J. Earth Sci.*, **109**, 2049-2079. <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01888-8>
- Teipel U., Eichhorn R., Loth G., Rohrmüller J., Holl R., Kennedy A. (2004) U–Pb SHRIMP and Nd isotopic data from the western Bohemian Massif (Bayerischer Wald, Germany): implications for Upper Vendian and Lower Ordovician magmatism. *Int. J. Earth Sci.*, **93**(5), 782-801. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0419-2>
- Terentiev R., Savko K., Petrakova M., Santosh M., Korish E. (2020) Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Res.*, **346**, 105790. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
- Vermeesch P. (2004) How many grains are needed for a provenance study? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **224** (3-4), 351-441. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.037>
- Wang F.Y., Liu S.A., Li S.G., Yongsheng H. (2013) Contrasting Zircon Hf-O Isotopes and Trace Elements between Ore-Bearing and Ore-Barren Adakitic Rocks in Central-Eastern China: Implications for Genetic Relation to Cu-Au Mineralization. *Lithos*, **156-159**, 97-111. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.10.017>
- Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Mag.*, **85**, 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Wilde S.A., Valley J.W., Peck V.H., Graham C.M. (2001) Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, **409**, 175-178. <https://doi.org/10.1038/35051550>
- Zeh A., Gerdes A., Klemd R., Led R., Barton J.M. (2008) U-Pb and Lu-Hf isotope record of detrital zircon grains from the Limpopo Belt – evidence for crustal recycling at the Hadean to early-Archaean transition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 5304-5329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2008.07.033>
- Zhong S., Feng C., Seltmann R., Li D., Qu H. (2018) Can magmatic zircon be distinguished from hydrothermal zircon by trace element composition? The effect of mineral inclusions on zircon trace element composition. *Lithos*, **314-315**, 646-657. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.029>

REFERENCES

- Andersen T. (2005) Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chem. Geol.*, **216**(3-4), 249-270. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.11.013>
- Aranovich L.Ya., Bortnikov N.S., Borisov A.A. (2020) Oceanic Zircon as a Petrogenetic Indicator. *Russ. Geol. Geophys.*, **61**(5-6), 559-570 (translated from *Geol. Geofiz.*, **63**(4), 522-549). <https://doi.org/10.15372/RGG2019187>
- Arzamastsev A.A., Arzamastseva L.V., Shamatrina A.M., Travin A.V., Belyatsky B.V., Antonov A.V., Lariov A.N., Rodionov N.V., Sergeev S.A. (2007) Duration of formation of magmatic system of polyphase paleozoic alkaline complexes of the Central Kola: U–Pb, Rb–Sr, Ar–Ar data. *Dokl. Earth Sci.*, **413**(3), 432-436. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07030257>
- Balashov Y.A., Skublov S.G. (2011) Contrasting geochemistry of magmatic and secondary zircons. *Geochem. Int.*, **49**(6), 594-604. <https://doi.org/10.1134/S0016702911040033>
- Belkovskii A.I. (1987) Biotites and vermiculites of the Ufaley gneiss-migmatite complex (Middle Urals). Sverdlovsk, UrO RAN Publ., 59 p. (In Russ.)
- Belkovskii A.I. (2011) Geology and mineralogy of quartz veins of the Kyshtym deposit (Middle Urals). Miass, IMIN UrO RAN Publ., 234 p. (In Russ.)
- Belkovskii A.I. (1989) Symplectite eclogites of the Middle Urals. Sverdlovsk, IGG UNTs AN SSSR, 190 p. (In Russ.)
- Belkovskii A.I., Shardakova G.Yu., Kholodnov V.V., Udachin V.N., Konovalova E.V. (2018) New data on mineralogy and petrogeochemistry of alkaline rocks of the Kozlinogorsk complex. *Vestn. Permskogo Universiteta. Geol.*, **17**(4), 308-325. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.4.308>
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 602-622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Bibikova E.V., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., Bogdanova S.V., Postnikov A.V., Popova L.P., Glushchenko V.V. (2009) Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and

- granitoids. *Stratigr. Geol. Correl.*, **17**(6), 561-573. <http://dx.doi.org/10.1134/S086959380906001X>
- Chervyakovskaya M.V., Chervyakovskii V.S., Votyakov S.L. (2023) LA-ISP-MS determination of the trace and U-Pb isotopic composition of zircon: methodological aspects of the analysis "from one crater". *Minerals: structure, properties, research methods*. XIII All-Russian Youth Scientific Conference. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 300-302. (In Russ.)
- Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L., Fan J.-X. (2013) The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, **36**, 199-204. <http://dx.doi.org/10.18814/epiiugs/2013/v36i3/002>
- Echtler H.P., Ivanov K.S., Ronkin Y.L., Karsten L.A., Hetzel R., Noskov A.G. (1997) The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal. *Tectonophysics*, **276**(1-4), 229-251.
- Ferry J.M., Watson E.B. (2007) New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **154**, 429-437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
- Fershtater G.B. (2013) Paleozoic intrusive magmatism of the Middle and Southern Urals. Ekaterinburg, RIO UrO RAN Publ., 368 p. (In Russ.)
- Ferstater G.B., Krasnobaev A.A., Bea F., Montero P. (2012) Geochemistry of zircon from igneous and metamorphic rocks of the Urals. *Lithosphere (Russia)*, (4), 13-29. (In Russ.)
- Fu B., Mernagh T.P., Kita N.T., Kemp A.I.S., Valley J.W. (2009) Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: a case study from the Gidginbung high-sulphidation Au-Ag-(Cu) deposit, SE Australia. *Chem. Geol.*, **259**, 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.035>
- Grebennikov A.V., Khanchuk A.I. (2021) Geodynamics and magmatism of the Pacific type transform margins: basic theoretical aspects and discriminant diagrams. *Tikhookean. Geol.*, **40**(1), 3-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-1-3-24>
- Grigor'ev N.A. (2009) Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust. Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 381 p. (In Russ.)
- Grigor'ev N.A. (2005) Zircon as a carrier of zirconium and hafnium in the upper part of the continental crust. *Lithosphere (Russia)*, (1), 143-149. (In Russ.)
- Grimes C.B., Wooden J.L., Cheadle M.J., John B.E. (2015) "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **170**(5-6), article 46. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1199-3>
- Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B., Mazdab F.K., Wooden J.L., Cheadle M.J., Hanghoj K., Schwartz J.J. (2007) Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, **35**, 643-646. <https://doi.org/10.1130/G23603A>
- Harley S.L., Kelly N.M. (2007) Zircon tiny but timely. *Elements*, **3**(1), 13-18.
- Harrison T.M., Schmitt A.K. (2007) High sensitivity mapping of Ti distributions in Hadean zircons. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **261**, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.05.016>
- Hetzel R., Glodny J. (2002) A crustal-scale, orogen-parallel strike-slip fault in the Middle Urals: age, magnitude of displacement, and geodynamic significance. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, **91**, 231-245.
- Hetzel R., Romer R.L. (1999) U-Pb dating of the Verkniy Ufaley intrusion, middle Urals, Russia: a minimum age for subduction and amphibolite facies overprint of the East European continental margin. *Geol. Mag.*, **136**(5), 593-597.
- Hoskin P.W.O. (2005) Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(3), 637-648.
- Hoskin P.W.O., Ireland T.R. (2000) Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, **28**, 627-630. <https://doi.org/10.1130/0091-7613%282000%2928%3C627%3AREECOZ%3E2.0.CO%3B2>
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Zircon. Rev. Mineral. Geochem.*, **53**, 7-62. <http://dx.doi.org/10.2113/0530027>
- Hu Z.L., Wang X.W., Qin Z.P., Zhang J., Gao Y., Peng H. (2012) Basic Characteristics of Zircon Trace Elements and Their Genetic Significances in Jiama Copper Polymetallic Deposit. *Nonferrous Metals (Min. Sect.)*, **64**, 58-63.
- Hu P., Zhai Q., Cawood P.A., Weinberg R.F., Zhao G., Zhou R., Tang Y., Liua Y. (2024) Detrital zircon REE and tectonic settings. *Lithos*, **480-481**, 107661. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107661>
- Kaczmarek M.A., Müntener O., Rubatto D. (2008) Trace element chemistry and U-Pb dating of zircons from oceanic gabbros and their relationship with whole rock composition (Lanzo, Italian Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **155**(3), 295-312. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0243-3>
- Kaulina T.V. (2010) Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes. Apatity, 144 p. (In Russ.)
- Keilman G.A. (1974) Migmatite complexes of mobile belts. Moscow, Nedra Publ., 196 p. (In Russ.)
- Kholodnov V.V., Shardakova G.Yu., Fershtater G.B., Shagolov E.S. (2018) The Riphean Magmatism Preceding the Opening of Uralian Paleoocean: Geochemistry, Isotopes, Age, and Geodynamic Implications. *Geodynam. Tectonophys.*, **9**(2), 365-389. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0351>
- Kirkland C.L., Smithies R.H., Taylor R.J.M., Evans N., McDonald B. (2015) Zircon Th/U ratios in magmatic environs. *Lithos*, **212-215**, 397-414. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.11.021>
- Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Ronkin Yu.L., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. (2009) Polychronity and Polygenicity of Pegmatites of Gneissic-Amphibolitic Complexes as a Result of Continuous-Discontinuous Development of Suture Zones: Example of the Ufaley Metamorphic Block in the Middle Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **429**(2), 1443-1446. (In Russ.)
- 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. *Geochem. Int.*, **53**(9), 759-785. <https://doi.org/10.1134/S0016702915090025>
- Kozhevnikov V.N., Medvedev P.V., Skublov S.G., Marin Y.B., Systra Y., Valencia V. (2010) Hadean-Archean Detrital Zircons from Jatulian Quartzites and Conglo-

- merates of the Karelian Craton. *Dokl. Earth Sci.*, **431**(1), 318-323.
- Kozhevnikov V.N., Zemskov V.A. (2014) Hydrothermal zircons from ore amphibolites of the Travyanaya Guba massif, North Karelia. *Trudy Karel'skogo Nauchnogo Tsentra RAN*, (1), 76-89. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A. (1986) Zircon as an indicator of geological processes. Moscow, Nauka Publ., 145 p. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Cherednichenko N.V. (2005) Zircon Archaeology of the Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **400**(4), 510-514.
- Krasnobaev A.A., Necheukhin V.M., Sokolov V.B. (1998) Zircon geochronology and the problem of terranes of the Ural accretionary-folded system. *Ural. mineralog. sb. Miass, UB RAS*, (8), 196-206. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Puchkov V.N., Busharina S.V., Kozlov V.I., Presnyakov S.L. (2011) Zirconology of izranidites (Southern Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **439**(3), 394-398.
- Krasnobaev A.A., Pushkarev E.V., Busharina S.V., Gottman I.A. (2013) Zirconology of Clinopyroxenite of the Shigir Mountains (Ufaley Complex, Southern Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **450**(2), 647-651. <https://doi.org/10.7868/S0869565213170192>
- Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Busharina S.V., Cherednichenko N.V., Davydov V.A. (2010) Composition, zircons and zircon geochronology of the Ufaley complex metamorphites. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 157, 273-279. (In Russ.)
- Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Romanyuk T.V., Degtyarev K.E., Maslov A.V., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N., Pyzhova E.S. (2017) The first results of U/Pb dating detrital zircons from sandstones of zigalga Formation (Middle Riphean, the South Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **475**(2), 863-867. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17080-244>
- Kuznetsov N.B., Seregina E.S., Maslov A.V., Krupenin M.T., Belousova E.A., Romanyuk T.V., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N., Tsel'movich V.A. (2013) The First U-Pb (LA-ICP-MS) Isotope Data of Detrital Zircons from the Basal Levels of the Riphean Stratotype. *Dokl. Earth Sci.*, **451**(1), 724-728. <https://doi.org/10.7868/S0869565213210226>
- Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Gertseva M.V. (2005) Preordovician granitoids of the Timan-Ural region and the evolution of Proto-Uralids-timanids. *Syktvykar, Geoprint Publ.*, 100 p. (In Russ.)
- Li H., Watanabe K., Yonezu K. (2014) Zircon Morphology, Geochronology and Trace Element Geochemistry of the Granites from the Huangshaping Polymetallic Deposit, South China: Implications for the Magmatic Evolution and Mineralization Processes. *Ore Geol. Rev.*, **60**, 14-35. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.009>
- Linnemann U., Ouzegane K., Drareni A., Hofmann M., Becker S., Gärtner A., Sagawe A. (2011) Sands of West Gondwana: an archive of secular magmatism and plate interactions – a case study from the Cambro-Ordovician section of the Tassili Ouan Ahaggar (Algerian Sahara) using U–Pb–LA–ICP–MS detrital zircon ages. *Lithos*, **123**(1-4), 188-203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2011.01.010>
- Maslov A.V. (2004) Riphean and Vendian sedimentary sequences of the Timanides and Uralides, the eastern periphery of the East European Craton. The Neoproterozoic Timanide orogen of Eastern Baltica. *Geol. Soc., Lond., Memoirs*, **30**, 19-35. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.03>
- Maslov A.V., Ronkin Yu.L., Krupenin M.T., Lepikhina O.P., Gareev E.Z. (2004) The Lower Riphean Fine-Grained Aluminosilicate Clastic Rocks of the Bashkir Anticlinorium in the Southern Urals: Composition and Evolution of Their Provenance. *Geochem. Int.*, **42**(6), 561-578.
- Mineev D.A. (1959) Rare-earth epidote from pegmatites of the Middle Urals. *Dokl. AN SSSR*, **127**(4), 865-868. (In Russ.)
- Necheukhin V.M., Krasnobaev A.A., Sokolov V.B. (2000) Geochronology and structural position of the Lower Precambrian in the Ural accretion-folded framing of the Russian Plate. *General questions of the division of the Precambrian*. Apatity, 201-203. (In Russ.)
- Nedosekova I.L., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Savichev A.N. (2016) Granite pegmatites, carbonatites and hydrothermalites of the Ufa metamorphic complex. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 283 p. (In Russ.)
- Nosova A.A., Kargin A.V., Larionova Yu.O., Sazonova L.V., Gorozhanin V.M., Kovalev S.G. (2012) Mesoproterozoic within-plate province of the Western Urals: main petrogenetic rock types and their origin. *Petrology*, **20**(4), 356-390. <https://doi.org/10.1134/S086959111204008X>
- Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Nedosekova I.L., Savichev A.N. (2016) Granite pegmatites, carbonatites, and hydrothermalites of the Ufa metamorphic complex. Ekaterinburg, IGG UrO RAN; UGGU Publ., 273 p. (In Russ.)
- Ovchinnikov L.N., Dunaev V.A., Krasnobaev A.A. (1964) Materials on the absolute geochronology of the Urals. The absolute age of geological formations. Moscow, Nauka Publ., 157-171.
- Pearce J.A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, **100**(1), 14-48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. (2021) LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record. *Lithos*, **392-393**, 106068. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106068>
- Pelletier E., Cheilletz A., Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., Hakour A.E., Deloule E., Feraud G. (2007) Hydrothermal zircons: A tool for ion microprobe U–Pb dating of gold mineralization (Tamlalt-Menhouhou gold deposit – Morocco). *Chem. Geol.*, **245**, 135-161. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.07.026>
- Petrography and petrology of igneous, metamorphic and metasomatic rocks. (2001) Moscow, Logos Publ., 768 p. (In Russ.)
- Petrov G.A., Maslov A.V., Ronkin Yu.L. (2005) Paleozoic magmatic complexes of the Kvarukush-Kamennogorsk anticlinorium (Middle Urals): new data on geochemistry and geodynamics. *Lithosphere (Russia)*, (4), 42-69. (In Russ.)
- Petrov G.A., Ronkin Y.L., Maslov A.V., Gerdes A. (2015) First Results of U–Pb Dating of Detrital Zircons from Metasandstones of the Isherim Anticlinorium (North Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **464**(2), 1010-1014. <https://doi.org/10.7868/S086956521529023X>
- Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and Cis-Urals (actual problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 280 p. (In Russ.)

- Puchkov V.N. (2018) The plume-dependent granite-rhyolite magmatism. *Lithosphere (Russia)*, (5), 692-705. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-692-705>
- Pushkarev E.V., Gottman I.A., Ryazancev A.V., Degtyarev K.E., Kamenetsky V.S. (2018) Ankaramite: a new type of high-magnesium and high-calcium primitive melt in the Magnitogorsk island-arc zone (Southern Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **479**(2), 463-467. <https://doi.org/10.7868/S0869565218100171>
- Pystin A.M., Grakova O.V., Pystina Yu.I., Kushmanova E.V., Popvasev K.S., Potapov I.L., Khubanov V.B. (2022) U-Pb (LA-SF-ICP-MS) dating and probable provenance of detrital zircons from terrigenous deposits of the Upper Precambrian of the Subpolar Urals. *Lithosphere (Russia)*, (6), 741-760. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-741-760>
- Pystin A.M., Pystina Yu. I. (2015) Archean-Paleoproterozoic history of rock metamorphism in the Ural segment of the Earth's crust. Precambrian geology. *Trudy Karel'skogo Nauchnogo Tsentra RAN*, (7), 3-18.
- Pystin A.M., Pystina S.N., Lennykh V.I. (1976) Changes in the chemical and mineral composition of gabbroids during metamorphism (western slope of the Southern Urals). *Alkaline, basic and ultrabasic complexes of the Urals*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 41-54.
- Pystin A.M., Ronkin Yu. L., Sindern S., Pystina Yu. I. (2012) Geochronological history of rock metamorphism in the pre-Riphean formations of the western slope of the Southern Urals. *Vestnik Instituta Geologii Komi NTs UrO RAN*, **11**(215), 2-8. (In Russ.)
- Report on the results of work on the facility: "Work on the assessment of geological and geophysical studies and the preparation of materials on the geological justification of the GDP200 within sheet O-40-XXXVI (Nyazepetrovskaya square)". (2020) Chelyabinsk, OOO NTPP Geopoisik, 280 p. (In Russ.)
- Romanyuk T.V., Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N. (2018) Paleotectonic and paleogeographic conditions for the accumulation of the Lower Riphean Ai Formation in the Bashkir Uplift (Southern Urals): the terranechron® detrital zircon study. *Geodynam. Tectonophys.*, **9**(1), 1-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0335>
- Romanyuk T.V., Kuznetsov N.B., Novikova A.S., Latysheva I.V., Fedyukin I.V., Dubenskiy A.S., Erofeeva K.G., Sheshukov V.S. (2024) Magmatites of the Kastel Mountain as a Local Source of Detrital Zircons for the Demerdzhi Formation (Southern Demerdzhi Mountain), Mountainous Crimea. *Geodynam. Tectonophys.*, **15**(6), 0794. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-6-0794>
- Ronkin Yu.L., Maslov A.V., Lepikhina O.P., Sindern S., Kramm U., Matukov D.I. (2007) Oldest (3.5 GA) zircons of the Urals: U-PB (SHRIMP-II) and TDM constraints. *Dokl. Earth Sci.*, **415**(2), 860-865.
- Ronkin Yu.L., Sindern S., Lepikhina O.P. (2012) Isotopic geology of the oldest formations of the Southern Urals. *Lithosphere (Russia)*, (5), 50-76. (In Russ.)
- Rusin A.I. (2007) Highly baric metamorphism of the Urals. Geodynamics, magmatism, metamorphism, and ore formation. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 154, 421-460. (In Russ.)
- Rusin A.I., Krasnobaev A.A. (1984) Ancient crust and the problem of gray gneisses in the Urals. *Natural associations of gray gneisses of the Archean (geology and petrology)*. Leningrad, Nauka Publ., 94-104. (In Russ.)
- Savva E.V., Belyatsky B.V., Antonov A.V. (2010) Carbonatitic zircon. *Acta Mineralogica-Petrographica*. Abstract series, **6**, 576.
- Schwartz T.M., Surpless K.D., Colgan J.P., Johnstone S.A., Holm-Denoma C.S. (2021) Detrital zircon record of magmatism and sediment dispersal across the North American Cordilleran arc system (28–48°N). *Earth-Sci. Rev.*, **220**, 103734. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103734>
- Sergeeva L.Yu., Gusev N.I., Skublov S.G., Li S.-Kh., Li Ch.-L. (2020) Paleoproterozoic detrital zircon from quartzites of the Daldyn series (Anabar shield): geochemistry, oxygen isotope composition and age. *Minerals: structure, properties, research methods*. XI All-Russian Youth Sci. Conf. Ekaterinburg, 260-261. (In Russ.)
- Shardakova G.Y. (2016a) 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. *Geochem. Int.*, **54**(7), 594-608. <https://doi.org/10.7868/S0016752516070098>
- Shardakova G.Yu. (2016b) Granitoids of the Ufaley Block: Geodynamic environments, age, sources, problems. *Lithosphere (Russia)*, (4), 133-137. (In Russ.)
- Shardakova G.Yu., Belkovskii A.I., Leonova L.V. (2022) Accessory mineralization of Precambrian amphibolites and associated acid rocks of the Kozlinogorsk rare metal occurrence (Ufaley block, Middle Urals). *Modern trends in the development of geochemistry*. Conf. materials. Irkutsk, IGSO RAN Publ., 229-233. (In Russ.)
- Shardakova G.Y., Chervyakovskaya M.V. (2020) Vendian-Cambrian granitoids of the Ufaley block (Middle Urals): new isotopic data, substrate composition, potential ore content. *Izv. UGGU*, **58**(2), 48-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-48-63>
- Shardakova G.Yu., Pribavkin S.V., Krasnobaev A.A., Borodina N.S., Chervyakovskaya M.V. (2021) Zircons from rocks of the Murzinka-Adui metamorphic complex: geochemistry, thermometry, polychronism, and genetic consequences. *Geodynam. Tectonophys.*, **12**(2), 332-349. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0527>
- Shardakova G.Yu., Pushkarev E.V., Kotov A.B., Simankova O.A. (2024) Evidence of the Early Precambrian Age of Metamorphic Rocks from the Ufaley Block (Middle Urals): Results of U-Th-Pb (LA-ICP-MS) Dating of Detrital Zircon from the Quaternary Deposits. *Dokl. Earth Sci.*, **519**(2), 2017-2022. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X24604073>
- Scherer E.E., Whitehouse M.J., Münker C. (2007) Zircon as a Monitor of Crustal Growth. *Elements*, **3**(1), 19-24.
- Shardakova G.Yu., Savel'ev V.P., Puzhakov B.A., Petrov V.I. (2015) New data on the chemical composition and age of rocks of the Kozlinogorsk complex. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 162, 148-154. (In Russ.)
- Sindern S., Ronkin Yu.L., Hettsetl' R., Shchul'te B.A., Kramm U., Maslov A.V., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. (2006) Taratashsky and Alexandrovsky metamorphic complexes (Southern Urals): P-T constraints. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 154, 322-330.
- Sircombe K.N., Bleeker W., Stern R. (2001) Archean provenance: a systematic detrital zircon investigation of supracrustals in the Slave craton, Canada. Proc. Fourth Intern. Archean Symp. Ext. Abstracts. *AGSO-Geosci.*

- Australia Record*, **37**, 263-265.
- Slabunov A.I., Nesterova N.S., Egorov A.V., Kuleshevich L.V., Kevlich V.I. (2021) Age of the Archean strata with Banded Iron Formation in the Kostomuksha greenstone belt, Karelian craton, Fennoscandian shield: constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. *Geochem. Int.*, **59**(4), 341-356. <https://doi.org/10.31857/S0016752521040063>
- Smol'kin V.F., Skublov S.G., Vetrin V.R. (2020) Trace Elements Composition of Detrital Zircon of Archean age from Jatulian Terrigenous Rocks of Fennoscandia. *Zapiski RMO*, **CXLIX**(6), 85-100. (In Russ.)
- Soboleva A.A., Andreichev V.L., Burtsev I.N., Nikolova N.Yu., Khubanov V.B., Sobolev I.D. (2019) Detrital zircons from Upper Precambrian rocks of the Vymskaya series of the Middle Timan: u-pb age and sources of demolition. *Bull. MOIP. Otd. Geol.*, **94**(1), 3-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S086960552006012X>
- Somsikova A.V., Anosova M.O., Fedotova A.A., Fugzan M.M., Kirnozova T.I., Tevelev A.V., Astrakhan-tsev O.V. (2022) Isotope-Geochemical Features of the Migmatites of the Taratash Metamorphic Complex (Southern Urals). *Geochem. Int.*, **60**(10), 911-927. <https://doi.org/10.31857/S0016752522100107>
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: magmatism in the ocean basins. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **42**, 313-346.
- Szczepański J., Turniak K., Anczkiewicz R., Gleichner P. (2020) Dating of detrital zircons and tracing the provenance of quartzites from the Bystrzyckie Mts: implications for the tectonic setting of the Early Palaeozoic sedimentary basin developed on the Gondwana margin. *Int. J. Earth Sci.*, **109**, 2049-2079. <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01888-8>
- Teipel U., Eichhorn R., Loth G., Rohrmuller J., Holl R., Kennedy A. (2004) U-Pb SHRIMP and Nd isotopic data from the western Bohemian Massif (Bayerischer Wald, Germany): implications for Upper Vendian and Lower Ordovician magmatism. *Int. J. Earth Sci.*, **93**(5), 782-801. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0419-2>
- Terentiev R., Savko K., Petrakova M., Santosh M., Korish E. (2020) Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Res.*, **346**, 105790. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
- Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Tevelev A.V., Khotylev A.O., Moseichuk V.M., Petrov V.I. (2015) New data on the isotopic age of the Taratash and Alexandrovsky metamorphic complexes. *Vestn. MGU. Ser. 4. Geol.*, (1), 27-42. (In Russ.)
- The 1:200,000 scale State Geological Map of the Russian Federation. Second edition. (2021) The South Ural series. N-41-I (Kyshtym). Explanatory note. Ministry of Natural Resources of Russia, Rosnedra, Chelyabinsk, JSC "Chelyabinsk Geoscience". Moscow, Moscow branch of FSBI VSEGEI, 181 p. (In Russ.)
- Wang F.Y., Liu S.A., Li S.G., Yongsheng H. (2013) Contrasting Zircon Hf-O Isotopes and Trace Elements between Ore-Bearing and Ore-Barren Adakitic Rocks in Central-Eastern China: Implications for Genetic Relation to Cu-Au Mineralization. *Lithos*, **156-159**, 97-111. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.10.017>
- Warr L.N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Mag.*, **85**, 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Wilde S.A., Valley J.W., Peck V.H., Graham C.M. (2001) Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, **409**, 175-178. <https://doi.org/10.1038/35051550>
- Zeh A., Gerdes A., Klemd R., Led R., Barton J.M. (2008) U-Pb and Lu-Hf isotope record of detrital zircon grains from the Limpopo Belt – evidence for crustal recycling at the Hadean to early-Archean transition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 5304-5329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2008.07.033>
- Zhong S., Feng C., Seltmann R., Li D., Qu H. (2018) Can magmatic zircon be distinguished from hydrothermal zircon by trace element composition? The effect of mineral inclusions on zircon trace element composition. *Lithos*, **314-315**, 646-657. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.029>