

УДК 550.93

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-411-431

U-Pb (ID-TIMS) геохронологический метод и SIMS приемы датирования циркона “*in situ*”: возможности и ограничения

Ю. Л. Ронкин¹, А. В. Маслов¹, С. Синдерн²

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: y-ronkin@mail.ru

²Институт минералогии и экономической геологии RWTH Университета, 52062, г. Аахен, Германия, e-mail: sindern@iml.rwth-aachen.de

Поступила в редакцию 24.08.2015 г., принята к печати 05.11.2019 г.

Объекты и методы исследований. Работа основана на сравнительном изучении авторских и литературных U-Pb ID-TIMS и “*in situ*” изотопных данных для цирконов, выделенных из ряда геологических объектов Урала (вулканогенных пород машакской свиты Башкирского мегантиклинория, гранитоидных массивов северной части хр. Уралтау, Кумбинского габбро-норитового массива Платиноносного пояса), диоритов Австралии и мафических ксенолитов Южной Африки. **Результаты.** Основы рассматриваемых методов ID-TIMS (ID-MC-ICP/MS) и SIMS датирования циркона фундаментально различаются, каждому из них присущи свои преимущества и недостатки, что необходимо учитывать при решении соответствующих геохронологических проблем. **Выводы.** U-Pb ID-TIMS (ID-MC-ICP/MS) методы позволяют анализировать единичные кристаллы, а также их фрагменты с беспрецедентно низкой погрешностью определяемого возраста (до 0.05%). Главным недостатком U-Pb SIMS метода является значительная погрешность U-Pb датирования (2–5%), “маскирующая” возможные потери Pb (и/или привнос U), что обуславливает появление артефактов при интерпретации U-Pb цирконовых данных. Это, в свою очередь, приводит к выделению несуществующих этапов магматизма, метаморфизма, ложным представлениям о длительности эволюции изучаемых геологических объектов и т. д. Применение U-Pb SIMS методов должно быть ограничено решением геологических задач, не требующих высокой точности датирования (т. е. допускающих определение возраста оценочного характера), но связанных с необходимостью изучения большого числа образцов и соответствующего количества зерен циркона. К примеру, таковым является исследование обломочного вещества в целях реконструкции источников и геологических условий формирования осадочных бассейнов. Другими задачами, адекватными возможностям U-Pb SIMS, при решении которых этот метод может использоваться, может служить изучение гетерогенности кристаллов циркона сложного строения при предварительном отборе материала для последующего высокоточного датирования U-Pb ID-TIMS и/или ID-MC-ICP/MS способами. Расширение числа лабораторий, применяющих эти высокоточные методы, представляется важнейшим направлением развития отечественной изотопной геохронологии.

Ключевые слова: U-Pb ID-TIMS и SIMS методы датирования циркона

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках темы № АААА-А18-118053090044-1 государственного задания ИГГ УрО РАН.

U-Pb (ID-TIMS) geochronological method and “*in-situ*” SIMS zircon dating: possibilities and constrains

Yuri L. Ronkin¹, Andrei V. Maslov¹, Sven Sindern²

¹Institute of Geology and Geochemistry Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: y-ronkin@mail.ru

²Institute of Mineralogy and Economic Geology, RWTH University, Aachen 52062, Germany, e-mail: sindern@iml.rwth-aachen.de

Received 24.08.2015, accepted 05.11.2019

Research subject and methods. The work is based on a comparative study of the data obtained by the authors and those published in literature on U-Pb ID-TIMS and “*in-situ*” isotopic examination of zircons extracted from a number of Ural geological objects (volcanogenic rocks of the Mashak Formation of the Bashkir Meganticlinorium, granitoid massifs of the Northern part of the Uraltau Ridge, Kumba gabbro-norite massif Platinum-bearing belt), as well as Australian diorites and South African mafic xenoliths. **Results.** Since the methods of ID-TIMS (ID-MC-ICP/MS) and SIMS dating of

Для цитирования: Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Синдерн С. (2020) U-Pb (ID-TIMS) геохронологический метод и SIMS приемы датирования циркона “*in situ*”: возможности и ограничения. *Литосфера*, 20(3), 411–431. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-411-431

For citation: Ronkin Yu.L., Maslov A.V., Sindern S. (2020) U-Pb (ID-TIMS) geochronological method and “*in-situ*” SIMS zircon dating: possibilities and constrains. *Litosfera*, 20(3), 411–431. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-411-431

© Ю.Л. Ронкин, А.В. Маслов, С. Синдерн, 2020

zircon are fundamentally different, their advantages and disadvantages should be taken into account when solving the corresponding geochronological problems. *Conclusions.* U-Pb ID-TIMS (ID-MC-ICP/MS) methods allow the analysis of individual crystals, as well as their fragments, with an unprecedented level of uncertainty concerning age dating (up to 0.05%). The main drawback of the U-Pb SIMS method consists in a significant error when dating U-Pb (2–5%), which might disguise possible Pb losses (and / or U-contribution) and lead to appearance of artifacts when interpreting U-Pb zircon data. This, in turn, leads to the identification of non-existent stages of magmatism, metamorphism, false ideas about the length of evolutionary processes, etc. The use of U-Pb SIMS methods should be limited to solving geological problems that do not require a high accuracy of dating (i.e., allowing rough estimation) but involving the need to study a large number of samples and corresponding zircon grains. Such problems arise during examination of clastic material in the process of reconstructing sources and geological conditions of sedimentary basin formation. U-Pb SIMS methods can be used for studying the heterogeneity of zircon crystals having a complex structure under preliminary selection of materials for subsequent high-precision dating using U-Pb ID-TIMS and / or ID-MC-ICP/MS methods. The expansion of the number of laboratories using these high-precision methods seems to be the most important direction in the development of Russian isotope geochronology.

Keywords: *U-Pb ID-TIMS, SIMS, zircon dating*

Funding information

The studies were carried out within the framework of topic No. AAAA-A18-118053090044-1 of the state task of IGG UB RAS.

Acknowledgements

The authors are grateful to Academician I.V. Chernyshev for his suggestion to consider this problem and for critical review of the manuscript.

ВВЕДЕНИЕ

U-Pb метод датирования, основанный на феномене радиоактивного распада изотопов урана $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$, $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$, с периодами полураспада 0.70381 ± 0.00048 и 4.4683 ± 0.0024 млрд лет соответственно (Jaffey et al., 1971), является первым геохронометром, реализованным для урансодержащих минералов (Boltwood, 1907). По мере совершенствования аналитической базы методов изотопной геологии появилась возможность изучения U-Pb систем минералов с более низкими содержаниями U и Th, в частности циркона (Keevil, 1939; Tilton et al., 1955), абсолютного рекордсмена по количеству выполненных по нему определений U-Pb возраста в сравнении с менее популярными: бадделеитом, монацитом, ортитом, ксенотимом, оксидами урана (уранинитом, настураном) и некоторыми другими.

Адресуя читателя к статье (Davis et al., 2003), в которой излагаются исчерпывающие сведения об истории развития метода, необходимо отметить, что в настоящее время U-Pb датирование циркона осуществляется преимущественно несколькими способами. Исторически первым и наиболее развитым является классический U-Pb метод, использующий изотопное разбавление (ID – Isotope Dilution, с трассером¹, имеющим искусственно обогащенный относительно природного изотопный состав

Pb и U), с последующим масс-спектрометрическим анализом соответствующих смесей трассера и исследуемого материала с помощью прецизионных масс-спектрометров, с термоионной ионизацией (TIMS – Thermal Ionization Mass Spectrometry) и/или секторных (Sector Field) мультиколлекторных (Multi-Collector) с ионизацией в индуктивно-связанной плазме (ICP/MS – Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry).

Другими технологиями U-Pb датирования циркона являются локальные “in situ” методы, позволяющие анализировать U-Pb изотопный состав нанограммовых объемов вещества и менее. Инструменты, реализующие подобный подход, основаны на масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS – Secondary Ion Mass Spectrometry (Ireland, Williams, 2003)) и лазерной абляции LA-ICP/MS (Kosler, Sylvester, 2003).

Фундаментальные различия рассматриваемых вариантов методов U-Pb датирования обуславливают соответствующие возможности и ограничения, что и является предметом настоящей статьи, ориентированной на сравнение этих методов в практике геохронологических работ.

U-Pb ID-TIMS МЕТОД

С момента первого U-Pb датирования циркона (Tilton et al., 1955) минуло более 65 лет, за это время благодаря научно-техническому развитию и

¹ Spike – англ.

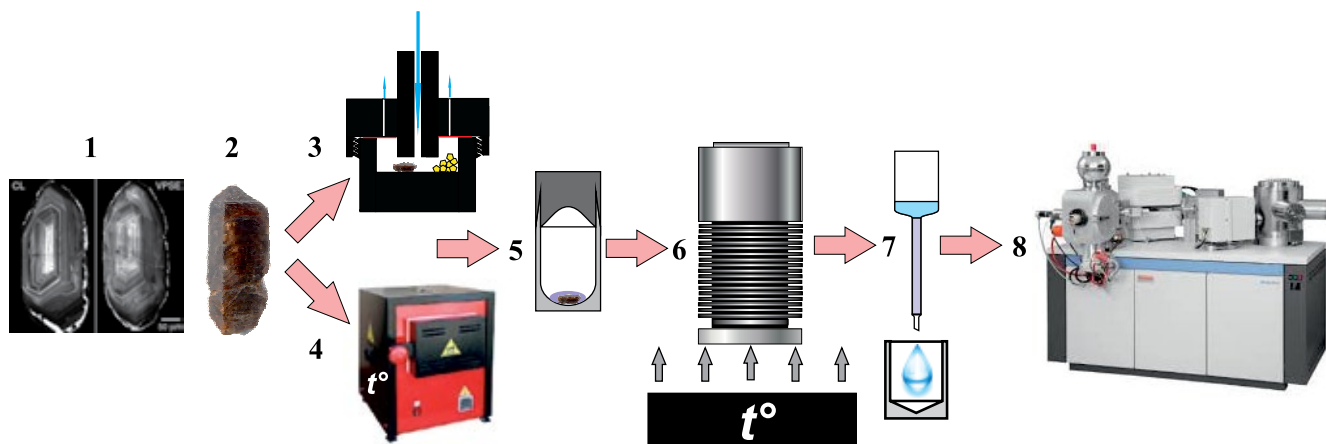


Рис. 1. Упрощенная схема U-Pb ID-TIMS датирования циркона.

1 – люминесцентная спектроскопия; 2 – исходный кристалл циркона; 3, 4 – аэро- (концентрат пирита + сжатый воздух, 0.1–0.2 бар в специальном устройстве (Krogh, 1982)) и/или химическая (смесью HF + HNO₃ кислот, а также прогрев в муфельной печи) абразия; 5 – добавление U + Pb спайки и смеси HF + HNO₃ кислот, кислотное разложение; 6 – кислотное разложение в автоклаве; 7 – колоночная хроматография в целях выделения фракций U и Pb; 8 – TIMS анализ изотопного состава U и Pb смесей спайки и исследуемого циркона.

Fig. 1. Simplified scheme of U-Pb ID-TIMS zircon dating.

1 – luminescence spectroscopy; 2 – initial zircon crystal; 3, 4 – air (pyrite concentrate + compressed air, 0.1–0.2 bar in a special device (Krogh, 1982)) and/or chemical (with a mixture of HF + HNO₃ acids, as well as heating in a muffle furnace) abrasion; 5 – addition of U + Pb spike and mixtures of HF + HNO₃ acid decomposition; 6 – acid decomposition in the autoclave; 7 – column chromatography, with the aim of separating the fractions of U and Pb; 8 – TIMS analysis of the isotopic composition of U and Pb mixtures of spike and zircon under study.

усилиям многих выдающихся исследователей был достигнут значительный прогресс в отношении возможностей метода в смысле как беспрецедентных величин погрешностей определяемого возраста (менее 0.05%), так и количества анализируемого материала (вплоть до фрагментов единичного кристалла) (Davis et al., 1989; Mattinson, 2005; Bowring et al., 2006; Moser et al., 2009; Keeley et al., 2012; Schmitz, Kuiper, 2013; Schoene, 2014; Schaltegger et al., 2015; Ронкин и др., 2016; и др.). С современных позиций (Mattinson, 2005) последовательность аналитических процедур с учетом определенных упрощений представлена на рис. 1.

Выбор индивидов циркона для U-Pb датирования определяется спецификой решаемой геохронологической задачи, однако в любом случае, в соответствии с проблемой, отправным моментом является изучение особенностей внутреннего строения кристаллов циркона с помощью методов электронной спектроскопии CL, BSE и т. д. (см. стадия 1, рис. 1). Далее отобранные цирконы подвергаются прогреву (до 48 ч) при высокой температуре (до 1000°C) в муфельной печи в целях минимизации влияния дефектов кристаллической решетки, после чего осуществляются аэро- и/или химическая абразия для селективного удаления тех доменов в цирконе, которые потеряли Pb (см. стадии 3, 4, рис. 1), а также многократная промывка реагентами и ультразвуком. На стадии 5 подготовлен-

ные описанным способом кристаллы помещаются в микрокапсулы с добавлением кислот HF + HNO₃ и смешанного U-Pb спайки, приготовление и калибровка которого представляет далеко не простую самостоятельную проблему (Condon et al., 2015). Кислотное разложение циркона в смеси кислот и трассера производится в автоклавах при температурах до 180°C (см. стадия 6, рис. 1). После хроматографического разделения фракций урана и свинца соответствующий изотопный анализ этих элементов осуществляется с помощью мультиколлекторных масс-спектрометров (TIMS и/или ICP/MS). Все процедуры по химической пробоподготовке выполняются в так называемых “чистых помещениях”, позволяющих ограничить контаминацию ксеногенными загрязнениями.

Важным преимуществом ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS перед SIMS методами является то, что концентрации и изотопный состав Pb и U в исследуемом веществе определяются с высокой точностью, непосредственно по соответствующим ионным токам изотопов этих элементов, исключая процедуру калибровки по стандарту с известным возрастом. Тем не менее эти достаточно трудоемкие и дорогостоящие методики предполагают реализацию “чистой химии” (наличие специального стерильного производственного помещения, очищенных реагентов и перегонных аппаратов для их приготовления, тонкой хроматографии, калиброванных

растворов, трассеров, изотопных стандартов, точных весов и т. д., затраты на которые нередко достигают значительных величин), а также использование прецизионного TIMS или MC-ICP/MS масс-спектрометра. Кроме того, поддержание соответствующего уровня персонала и рабочего ритма такой лаборатории представляет собой непростую задачу. Известные методологические трудности вызывает U-Pb ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS датирование полифазного циркона, требующее реализации физической и химической сепарации (Krogh, 1982; Mattinson, 2005), селективного разложения (Krogh, Davis, 1985)). Однако, как показано далее, рассмотренный метод в настоящее время является наиболее точным, не имеющим альтернативы по этому параметру.

U-Pb SIMS МЕТОД

В настоящее время доминирующими инструментами для U-Pb SIMS датирования циркона являются SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe), представляющий собой прецизионный вторично-ионный микрозонд высокого разрешения (ASI, Австралия), а также его SIMS аналоги Cameca IMS (1270, 1280) производства одноименной французской фирмы и VG Isolab 120 (Великобритания).

Принцип работы SHRIMP основан на том, что пучок ионов $^{16}\text{O}_2^-$, ускоряемых напряжением до 10 кВ, фокусируется оптикой Кохлера в параллельный пучок поперечным сечением 5–30 мкм и направляется на поверхность анализируемого образца. Ионная бомбардировка, формируя на мишени кратер, соизмеримый с диаметром кислородного пучка и глубиной до 3–4 мкм, выбивает атомы и молекулы из мишени, частично ионизуя их. Эти вторичные ионы вытягиваются электростатическими линзами вторичной колонны из области ионизации и после фокусировки вторичного пучка направляются в масс-анализатор с разделением по массам и энергиям, попадая в приемную щель регистрирующего канала. Высокое разрешение SHRIMP (более 5000) позволяет производить практически полное отделение изотопов Pb и U от мешающих изобарных наложений (Zr_2O , HfO_2 , HfSi), характерных для спектра вторичных ионов, эмитированных, например, цирконовой мишенью. В результате ионной бомбардировки первичным пучком генерируются ионы урана как U^+ , так и в окисном и двуокисном видах, в приблизительном соотношении 3 : 7 : 1 ($\text{UO}_2^+/\text{UO}^+/\text{U}^+$), в то время как свинец представлен почти полностью металлической формой – Pb^+ . В связи с этим получаемые в результате прямых измерений ионные отношения Pb^+/U^+ в наибольшей степени отличаются от истинных атомных U/Pb отношений в исследуемом веществе, что предполагает реализацию измерений по принципу “стандарт–образец”. В качестве

стандартного образца используется минерал, аналогичный исследуемому (это важно в силу наличия у любого ионного микрозонда матричного эффекта – примесь, имеющаяся в разных матрицах в одинаковых концентрациях, дает разные по интенсивности сигналы ионных токов), с аттестованным U/Pb отношением, по возможности гомогенным по всему объему.

Здесь уместно отметить, что при интерпретации U-Pb SIMS и LA-ICP-MS данных авторы (Краснобаев и др., 2007, с. 245, рис. 3) часто используют графики в координатах U–Th, U–Th/U для выделения тех или иных групп цирконов без указания погрешностей определения концентраций U и Th, которые могут достигать значительных величин для абсолютных значений, поскольку существует зависимость от используемого стандарта и от того, сколько раз он анализируется (имеется в виду статистика). Более того, существует мнение, что цирконами, реально пригодными для использования в качестве эталонов концентрации, являются megacrystals. Все остальные референсные кристаллы циркона, как правило, высокогетерогенны из-за естественного композиционного зонирования.

В практике U-Pb SIMS датирования стандартом циркона чаще всего являются аттестованные U-Pb ID-TIMS методом (!) природные кристаллы (далее все значения в млн лет): AUSZ2 – $38.8963 \pm 0.0044/0.012^{*2}$ (Kennedy et al., 2014; Plešovice – $337.13 \pm 0.06/0.23^*$ (Sláma et al., 2008); Temora 1 – $416.75 \pm 0.24^*$ (Black et al., 2003a); Temora 2 – $416.78 \pm 0.33^*$ (Black et al., 2004); R33 – $418.9 \pm 0.4^*$ (Black et al., 2004), $419.26 \pm 0.39^*$ (Black et al., 2004); GJ-1 – $608.53 \pm 0.37^{**3}$ (Jackson et al., 2004; GJ-1 nr. 67 – $600.5 \pm 0.4^*$ (Boekhout et al., 2012); Harvard 91500 – $1065.4 \pm 0.3^{**}$ (Wiedenbeck, 1995), $1066.4 \pm 0.3/5.0^{**}$ (Schoene et al., 2008), $1063.6 \pm 0.2/0.3^*$ (Schoene et al., 2008); AS3 – $1099.1 \pm 0.5^{**}$ (Paces, Miller, 1993), $1099.0 \pm 0.7^*$ (Paces, Miller, 1993), $1098.6 \pm 0.3/5.0^{**}$ (Schoene et al., 2008), $1095.9 \pm 0.2/0.3^*$ (Schoene et al., 2008); FC1 – $1099.0 \pm 0.6^{**}$ (Paces, Miller, 1993), $1099.9 \pm 1.1^*$ (Paces, Miller, 1993); QGNG – $1851.5 \pm 0.3^{**}$ (Schoene et al., 2008), $1848.7 \pm 0.7/0.9^*$ (Schoene et al., 2008).

Устройство SIMS Cameca 1270 и VG Isolab 120 в целом аналогично, за некоторыми исключениями, о чем более подробно изложено в работе (Ireland, 1995). Не вдаваясь в конструктивные различия этих приборов и SHRIMP, можно отметить, что чувствительность инструментов относительно Pb достаточно сходна (~25 импульсов/с на г/т вещества, при 1 нА токе первичного пучка). Первичные потоки луча для Cameca 1270 и SHRIMP обычно ограничиваются 10 нА для минимизации дискриминирующих эффектов и получения максимальной чувствительности при анализе циркона.

² * Здесь и далее – по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

³ ** Здесь и далее – по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$.

ВОЗМОЖНОСТИ U-Pb SIMS МЕТОДА

С момента появления в 1972 г. (Andersen, Hinthorne, 1972) и по настоящее время SIMS анализаторы и методология их применения подверглись значительному совершенствованию, что позволило решать многие как фундаментальные, так и прикладные задачи в науках о Земле (Ireland, 1995; Williams, 1998; Compston, 1999; Ireland, Williams, 2003; и др.). К известным примерам эффективно-го применения “in situ” датирования с помощью SIMS можно отнести определение U-Pb SHRIMP возраста 4.56 млрд лет древнейшего циркона Солнечной системы, выделенного из двух метеоритов Vaca Muerta и одного – Simmern (Ireland, Wlotzka, 1992); изучение эволюции U-Pb системы циркона (4.32–3.88 млрд лет), извлеченного из лунного грунта (Meyer et al., 1996); U-Pb SHRIMP датирование древнейших цирконов Земли, выделенных из метаморфических пород Австралии (4.4 млрд лет) (Wilde et al., 2001) и Канады (4.03 млрд лет) (Bowring, Williams, 1999); определение U-Pb SHRIMP возраста древнейшего циркона Уральско-го складчатого пояса (3.5 млрд лет), выделенного из гнейсов Тараташского комплекса (Ронкин и др., 2007), что оказалось реализовано благодаря уникальной возможности U-Pb SIMS датирования нанообъемов (2 нг и менее за анализ) в пределах одного кристалла. Данное обстоятельство крайне важно при дефиците исходного вещества (единичные акцессории из уникального материала, метеоритов и тому подобных объектов). Кроме того, такая геометрическая селективность позволяет анализировать отдельные области и домены в целях реконструкции эволюции изучаемого кристалла.

Другой полезной не требующей высокой точности возможностью является высокопроизводительное U-Pb SIMS датирование многих сотен и тысяч детритовых цирконов, поскольку этот вид анализа поддерживает одно из важнейших направлений в исследовании транспортировки обломочных компонентов при процессах осадконакопления (Sircombe, 1997, 1999; Ireland et al., 1998; Goodge et al., 2002).

Наконец, SIMS анализаторы позволяют выявить закономерности профилевого распределения концентраций Pb, U и Th исследуемой мишени (Lee et al., 1997).

ОГРАНИЧЕНИЯ U-Pb SIMS МЕТОДА

Наряду с перечисленными возможностями SIMS метода, его *главным недостатком* является значительная, на порядок и более, погрешность U-Pb датирования в сравнении с ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS (Compston, 1999; Макеев, Левский, 2006; Ронкин и др., 2009) (наиболее существенно проявляющаяся для палеозойских и более “молодых” геологических событий, поскольку в этом случае основное

ограничение связано с неопределенностью в калибровке Pb/U отношения образований, характеризующихся относительно меньшим содержанием радиогенного Pb), что маскирует возможные потери Pb (и/или привнос U). Значительная неопределенность U-Pb SIMS датирования обуславливает тот факт, что на графиках с конкордией (например, в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) соответствующие размеры эллипсов погрешностей не позволяют сделать вывод о конкордантности или дискордантности⁴ фигуративной точки, что и показано в данной статье на конкретных примерах.

Иными словами, при U-Pb SIMS датировании часто складывается ситуация, когда положение фигуративной точки на графике с конкордией не может быть однозначно определено как конкордантное или дискордантное. Более того, нередко можно наблюдать случаи, когда при гигантской величине дискордантности между возрастaми, вычисленными по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, авторы публикации “привязывают” $T(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ к реальному геологическому событию.

Таким образом, существенная погрешность U-Pb SIMS датирования нередко обуславливает появление артефактов при интерпретации U-Pb цирконовых данных, что, в свою очередь, приводит к выделению “виртуальных этапов” магматизма, метаморфизма, ложным представлениям о длительной “эволюции” изучаемых геологических объектов и т. д. Наиболее значима неопределенность U-Pb SIMS датирования при использовании этого метода для калибровки геохронологической шкалы (Mundil et al., 2001), а также расчленения сближенных во времени геологических событий (Ронкин и др., 2009). Кроме того, в некоторых публикациях авторы вводят читателя в явное заблуждение, постулируя, что результаты U-Pb SIMS датирования циркона являются “прецизионными” (Краснобаев и др., 2007).

Настоящая работа направлена на прояснение тезиса, декларируемого в предыдущем абзаце, для достижения чего на основе фактического материала далее приводятся как компилятивные, так и авторские данные по сравнению результатов U-Pb SIMS и ID-TIMS датирования одних и тех же, в том числе уральских, геологических объектов.

U-Pb СТАНДАРТ TEMORA

Первым объектом для сопоставления результатов U-Pb SIMS и U-Pb ID-TIMS датирования может служить аттестованный стандарт Temora, представляющий циркон, выделенный из Middledale Gabbroic Diorite (Австралия). К настоящему времени этот стандарт всесторонне изучен, кроме того,

⁴ Дискордантность D (%) = $100(1 - (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})_{\text{возраст}} / (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_{\text{возраст}})$.

он многократно датирован U-Pb ID-TIMS методом, а количество выполненных по нему U-Pb SIMS анализов измеряется многими тысячами (Black et al., 2003а, б; Dunphy et al., 2003). Соответствующие исследования показали, что цирконы Temora являются в высокой степени конкордантными в отношении U-Pb ID-TIMS возрастных данных и гомогенными по U/Pb отношению, т. е. представляют собой пример “закрытой” изотопной U-Pb системы. Тем не менее гомогенность по U/Pb отношению в этих цирконах не сопровождается таковой по концентрациям U. Более того, U в цирконах Temora распределен относительно неравномерно, что отражается в наличии четко проявленной секториальной зональности на катодолюминесцентных изображениях (рис. 2).

На рис. 3а, в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ приведены результаты U-Pb SHRIMP датирования циркона стандарта Temora в сессии Z3673, выполненной в Австралии (Dunphy et al., 2003). Общее количество кратеров – 45. Аналитические погрешности по осям координат соответствуют $\pm 1\sigma$. Рассматриваемая диаграмма четко отображает значительный разброс (вариации дискордантности от –176.82 до +19.35) аналитических эллипсов относительно конкордии в диапазоне 380–445 млн лет, типичный для U-Pb SHRIMP датирования. Более того, некоторые фигуративные точки локализованы как выше конкордии, так и ниже нее, демонстрируя, в соответствии с имеющимися представлениями, потерю Pb и/или привнос U. Если не иметь независимых аргументов, формально можно утверждать о гетерогенности и “сложной истории” данного минерала. Аналогичные выводы можно сделать и по гистограммам, на которых приведен разброс возрастных значений, вычисленных по отношениям $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (рис. 4а–в соответственно). Анализ представленной информации позволяет сделать заключение о том, что только по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (см. рис. 4б) возможно оценить среднее значение возраста цирконов Temora – 416.2 ± 2.5 (0.61%), 95%-й доверительный уровень, СКВО = 1.20, вероятность соответствия – 0.17. Возрасты, вычисленные по остальным отношениям ($^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$), демонстрируют значительные вариации, характеризующаясь низкими вероятностями соответствия.

Совершенно другая картина наблюдается при анализе результатов U-Pb ID-TIMS датирования (25 кратеров) циркона Temora (Black et al., 2003а) (см. рис. 3б). Сравнение U-Pb ID-TIMS данных (см. рис. 3б) с U-Pb SHRIMP результатами (см. рис. 3а), нанесенными на график с конкордией в одинаковых масштабах, позволяет четко оценить, насколько значительно различие в погрешностях обоих методов. Значимое различие наблюдается и в величинах дискордантности. Из 25 значений, полученных ID-TIMS, только для 5 кратеров коэффициенты дискордантности имеют значения –1.46, +1.19, +1.23, +1.25, +1.68. Для

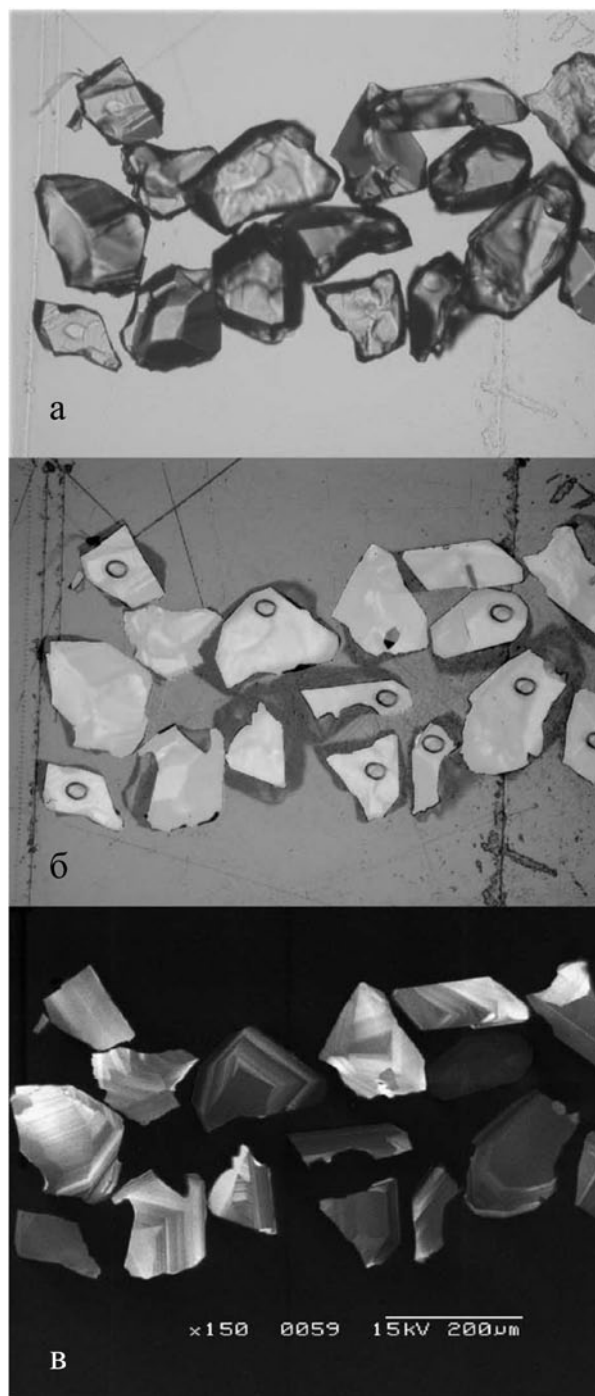


Рис. 2. Изображения кристаллов циркона Temora (Black et al., 2003а) полученные с помощью оптического и электронного микроскопов.

а, б – в проходящем и отраженном свете (видны кратеры после U-Pb SHRIMP датирования), в – катодолюминесценция.

Fig. 2. Images of Temora zircon crystals (Black et al., 2003а) obtained by optical and electron microscopes.

а, б – in transmitted and reflected light (craters are visible after U-Pb SHRIMP dating), в – cathodoluminescence.

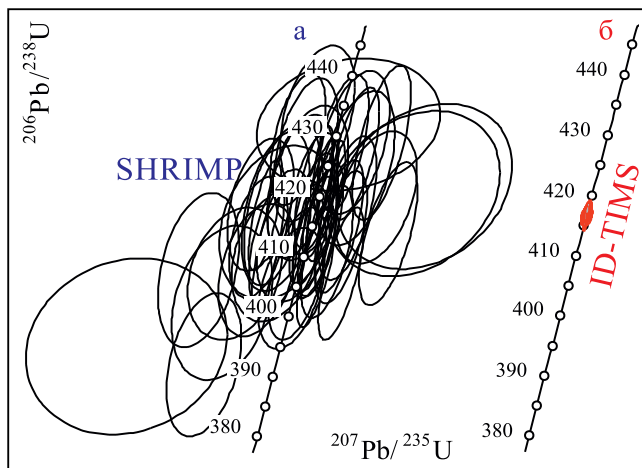


Рис. 3. U-Pb данные для циркона стандарта Temora.

Общее количество “кратеров” 45 шт.
а – U-Pb SHRIMP, сессия Z3673 (Dunphy et al., 2003). Аналитические погрешности по осям координат $\pm 1\sigma$.
б – U-Pb ID-TIMS (Black et al., 2003a), 416.75 ± 0.24 млн лет. Для сравнения “а” и “б” представлены в одном масштабе.

Fig. 3. U-Pb zircon data for standard Temora.

The total of “craters” is 45.
а – U-Pb SHRIMP, analytical session Z3673 (Dunphy et al., 2003). Analytical uncertainties are $\pm 1\sigma$.
б – U-Pb ID-TIMS (Black et al., 2003a), 416.75 ± 0.24 Ma. “а” and “б” are shown in the same scale.

остальных 20 кратеров все коэффициенты имеют величину менее 1, подтверждая возрастную гомогенность (в отличие от U-Pb SHRIMP результатов) исследуемого материала. Таким образом, U-Pb ID-TIMS данные позволяют оценить реальный возраст цирконов Temora как 416.75 млн лет с погрешностью всего лишь ± 0.24 млн лет.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Машакская свита стратотипа рифея

Проблема установления возраста вулканогенных пород машакской свиты Башкирского мегантиклинория, начинающей типовой разрез среднего рифея, методами изотопной геологии имеет более чем 35-летнюю историю, а соответствующие возрасты, полученные разными авторами и методами, характеризуются диапазоном 320–1538 млн лет. Тем не менее длительное время (с 1985 по 2005 г.) датировка 1348 ± 30 млн лет (Краснобаев и др., 1985) воспринималась как реперная, согласующаяся с традиционными представлениями об общей конструкции стратотипического разреза рифея (Козлов и др., 1989; Семихатов и др., 1991; Семихатов, 2000). Первые, более древние, значения возраста вулканитов машакской свиты до 1370 ± 16 млн лет были опубликованы в 2007 г. и основывались на данных локального

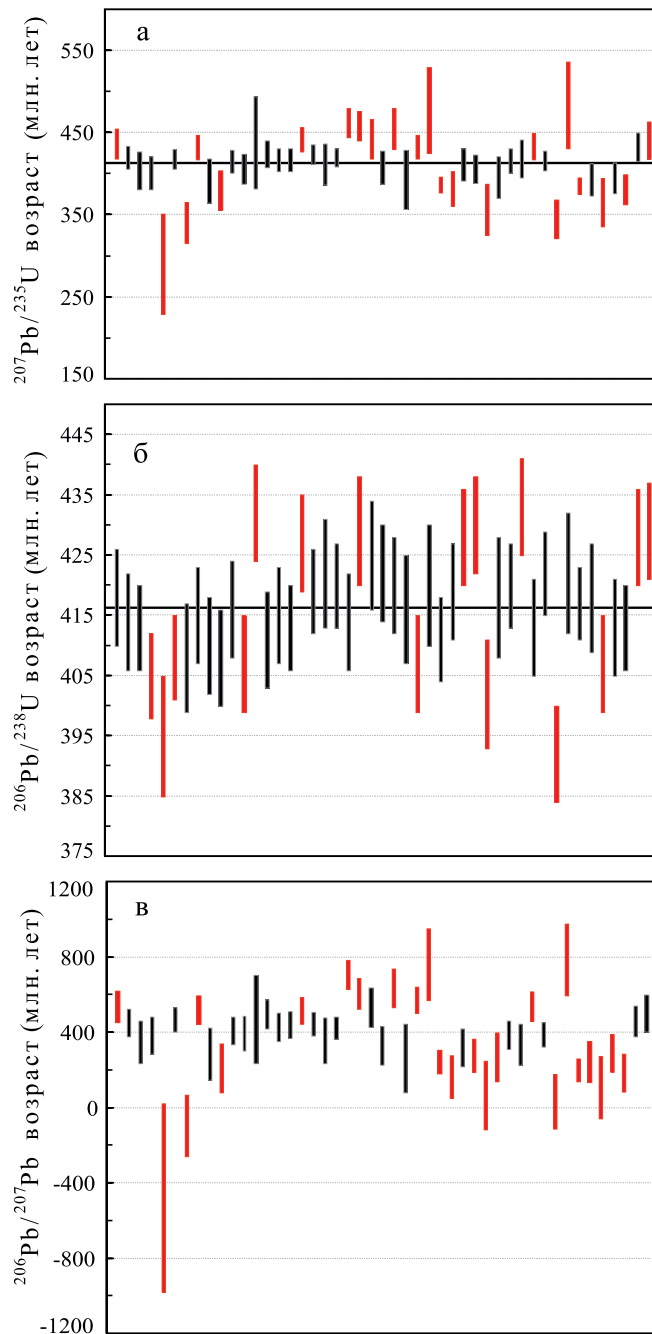


Рис. 4. Pb-U SHRIMP возрасты для циркона стандарта Temora, шайба Z3673 (Dunphy et al., 2003).

а – по отношениям $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, СКВО = 2.0, вероятность соответствия 0; б – по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, среднее значение возраста (горизонтальная утолщенная линия) 416.2 ± 2.5 (95%-й дов. уровень) млн лет, СКВО = 1.20, вероятность соответствия 0.17; в – по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, СКВО = 2.6, вероятность соответствия 0.

Fig. 4. Pb-U SHRIMP zircon ages for standard Temora, analytical session Z3673 (Dunphy et al., 2003).

Ages: а – by $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, MSWD = 2.0, the probability is 0; б – by $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, the average value of age (thickened horizontal line) 416.2 ± 2.5 (95% of the rows. level) Ma, MSWD = 1.20, 0.17 probability of compliance; в – by $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, MSWD = 2.6, the probability is 0.

U-Pb SHRIMP-II датирования выделенных из даци- тов цирконов (Ронкин и др., 2007а). Близкое (в пре- делах погрешностей) значение 1366 ± 12 млн лет фи- гурирует в работе (Пучков и др., 2007). Существенный диссонанс с устоявшимися представлениями о воз- расте эффузивов машакской свиты вызвали резуль- таты U-Pb SHRIMP-II датирования цирконов, вы- деленных из восьми образцов липаритов, риодаци- тов и metabазальтов машакской свиты (Краснобаев и др., 2008). Авторы этой работы утверждают, что из- ученные ими цирконы, отобранные несколькими ис- следователями в различных районах, представлены почти исключительно кристаллами вулканогенной природы, а их минералого-геохимические особен- ности практически однотипны. В то же время ана- лиз U-Pb систематики позволил авторам сделать вы- вод (с. 62), что “длительность машакского вулканиз- ма и сопутствующий ему эндогенных процессов ох- ватывает значительный интервал”, в котором выделяются четыре временных этапа: 1527 ± 11 млн лет, 1499.3 ± 9.7 , 1423.6 ± 5.8 и 1346 ± 6 млн лет. В каче- стве основного аргумента в пользу такого вывода в работе (Краснобаев и др., 2008) приведены данные по цирконам (по одному кратеру) для одного кри- сталла из каждого изученного образца, которые как будто дают совокупность датировок с разбросом от 1337 ± 19 до 1538 ± 12 млн лет. Предположение о дли- тельности машакского вулканизма в 170–200 млн лет, помимо явной непредставительности этих дан- ных, кажется сомнительным и по ряду других при- чин, на что мы указывали ранее (Маслов, Ронкин, 2008). Так, машакская вулканогенно-осадочная по- следовательность является, по мнению многих авто- ров (Парначев и др., 1986; Иванов и др., 1986; Парна- чев, 1988; и др.), рифтогенной ассоциацией, начина- ющей длительный этап субплатформенного авулкани- ческого развития территории современного Башкир- ского мегантиклинория в среднем рифее. Времен- ной интервал формирования подобных ассоциаций в большинстве случаев не превышает 40–50 млн лет (Einsele, 1992; Маслов, 1994; Осадочные бассейны..., 2004; и др.). На геологическую мгновенность форми- рования почти 3500-метровой вулканогенно-осадоч- ной машакской свиты и перекрывающих ее кварци- тов зигальгинской свиты (80–600 м) указывает и да- тировка диагенетических конкреций фосфоритов из зигазино-комаровской свиты, согласно сменяющей в типовом разрезе среднерифейской юрматинской се- рии зигальгинскую свиту – 1300 ± 30 млн лет (Ва- сильева и др., 2009) и 1330 ± 20 млн лет (Овчинни- кова и др., 2013). Ряд других аргументов, приведен- ных в работе (Маслов, Ронкин, 2008), также позволя- ют считать, что “машакский вулканизм”, скорее все- го, не является “изофаціальным” аналогом “айского вулканизма”⁵ (несмотря на то что авторы работы

⁵ “Айский вулканизм” здесь – вулканические породы в основании айской свиты бурзянской серии – типового подразделения нижнего рифея.

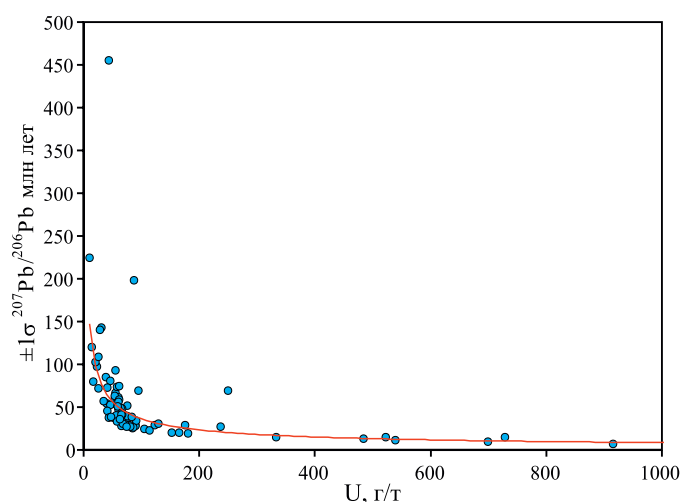


Рис. 5. Эмпирическая зависимость $\pm 1\sigma$ абсолют- ной погрешности U-Pb SHRIMP-II датирования от содержания урана в анализируемых кристал- лах циркона эффузивов машакской свиты (рекон- струкция по материалам (Пучков и др., 2009)).

Fig. 5. Empirical dependence $\pm 1\sigma$ absolute uncer- tainties of U-Pb SHRIMP-II dating from the urani- um content in the analyzed zircon crystals of Mashak volcanic formation (Puchkov et al., 2009).

(Краснобаев и др., 2008, с. 62) приписывают вул- канитам машакской свиты “связь с долгоживущим литосферным магматическим очагом под унасле- довано развивающимся рифтом в пределах восточ- ного крыла современной структуры Башкирского мегантиклинория”).

Приводимые авторами (Краснобаев и др., 2008) U-Pb SHRIMP-II данные дезавуируются резуль- татами прецизионного U-Pb CA ID-TIMS датирования цирконов, что особенно важно, **из тех же двух об- разцов** (К-323, К-898), которые были ранее проана- лизированы с помощью SIMS (Пучков и др., 2009).

Исследование, проведенное признанными спе- циалистами в области изотопной геологии из Уни- верситета Бойсе (США), выявило практически конкордантные U-Pb возрасты цирконов, млн лет: 1380.6 ± 1.1 , 1381.5 ± 1.0 (по отношениям $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) и 1380.1 ± 1.2 , 1380.3 ± 0.4 (по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) для образцов К-323 и К-898 соответственно.

Дополнительным фактом, показывающим не- определенность U-Pb SHRIMP-II датирования в рассматриваемом нами случае, является низкая концентрация U (до 20 г/т). В таких ситуациях ча- сто наблюдается полиномиальная зависимость по- грешности определения возраста от содержания U в цирконах (Ронкин и др., 2009), что проявляется в резком возрастании функции в области низких значений аргумента (рис. 5).

Для прояснения образовавшейся неопределен- ности с датированием вулкаников машакской сви-

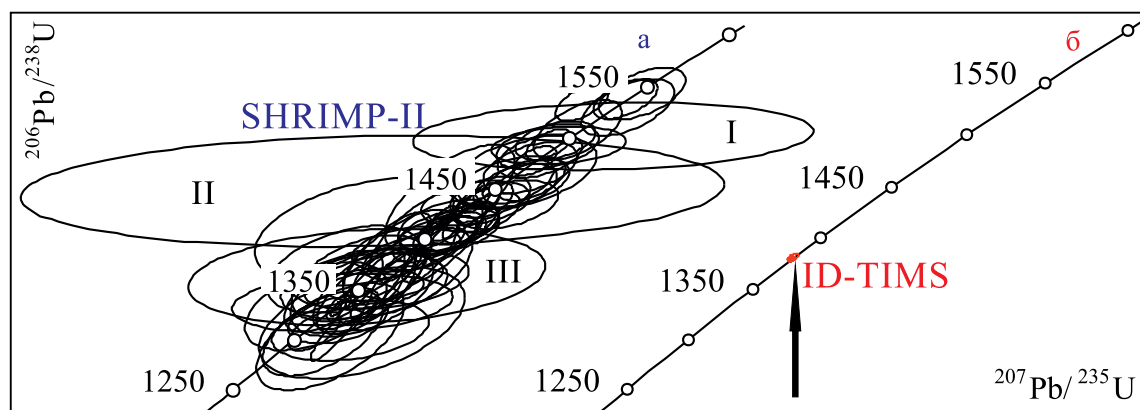


Рис. 6. Графики с конкордией для кристаллов циркона из эффузивов машакской свиты, Южный Урал.

a – U-Pb SHRIMP II данные (n = 78); б – U-Pb ID-TIMS 1379.15 ± 0.34 ($\pm 2\sigma$), СКВО = 0.00099, вероятность соответствия конкордантности 0.97.

Fig. 6. U-Pb concordia diagramm for zircon crystals from effusive Mashak Formation, Southern Urals.

a – U-Pb SHRIMP II data (n = 78); б – U-Pb ID-TIMS 1379.15 ± 0.34 ($\pm 2\sigma$), MSWD = 0.00099, the probability of concordance 0.97.

ты нами было выполнено U-Pb ID-TIMS датирование тех же цирконов, которые ранее анализировались SHRIMP-II (Ронкин и др., 2007а). Результаты U-Pb ID-TIMS датирования и ранее полученные SHRIMP-II данные приведены на соответствующем графике Аренса–Везерилла (рис. 6). Сравнение U-Pb ID-TIMS и SHRIMP-II данных, нанесенных на график с конкордией в одинаковых масштабах, позволяет четко оценить, насколько значительна разница в погрешностях обоих методов. Значимое различие наблюдается и в величинах дискордантности, однако главным выводом предпринятого нами исследования является то, что U-Pb ID-TIMS возраст “плохих” и “хороших” цирконов совпадает с концепцией о сравнительно узком интервале формирования эффузивов машакской свиты (около 1380 млн лет).

Резюмируя более чем 15-летнюю дискуссию о возрасте “машакского рифтогенного события” (Ронкин и др., 2005, 2007а; Пучков и др., 2007, 2009; Краснобаев и др., 2008; Маслов, Ронкин, 2008), можно говорить о весьма любопытном сценарии развития событий, во многом справедливом, как нам представляется, применительно к общей практике U-Pb датирования цирконов ID-TIMS и SHRIMP-II методами. Обычно при получении “сенсационных” U-Pb SIMS возрастов авторы пребывают в уверенности, что ими решена “прямая” геохронологическая задача датирования конкретного объекта. Однако с появлением U-Pb ID-TIMS данных по этим же минералам, отражающих иные временные закономерности, результаты SIMS датирования часто начинают рассматриваться в качестве основы для решения “обратной” геохронологической задачи. В этом случае U-Pb ID-TIMS возраст

обычно считается “реперным”, а SIMS результаты, отличающиеся от U-Pb ID-TIMS данных, начинают интерпретировать, при прочих равных условиях, исходя из концепций “омоложения”, “удревнения”, наличия унаследованного, ксеногенного материала и т. д., что в данном случае, безусловно, подтверждается работами (Ernst et al., 2008; Краснобаев и др., 2013; Puchkov et al., 2013).

Гранитоидные массивы северной части хр. Уралтау

В северной части этой, одной из крупнейших, структуры Южного Урала выделяются два комплекса гранитоидов – ахмеровский (один массив) и мазаринско-барангульский (два массива) (Алексеев, 1984). Если для гранитов Ахмеровского массива достаточно уверенно устанавливается допалеозойский возраст и до- или синтетектоническая природа (Алексеев, 1984), то формационный характер, геодинамическая обстановка, источники и время формирования гранитоидов мазаринско-барангульского комплекса пока остаются спорными. Так, наиболее крупный из входящих в его состав массивов – Барангуловский – первоначально относился к габбро-диорит-гранитной формации (Алексеев, 1976). Позднее он был сопоставлен с лейкогранит-аляскитовой или аляскитовой формациями (Алексеев, 1984). М.В. Рыкус с соавторами (2002) полагают, что в северной части хр. Уралтау присутствуют рифтогенные рифейско-вендские вулканические (мазаринская и аршинская свиты) и синколлизонные гранитоидные ассоциации (мазаринско-барангульский комплекс), а также ультрамафиты и расслоенные габбро (Кирябинский

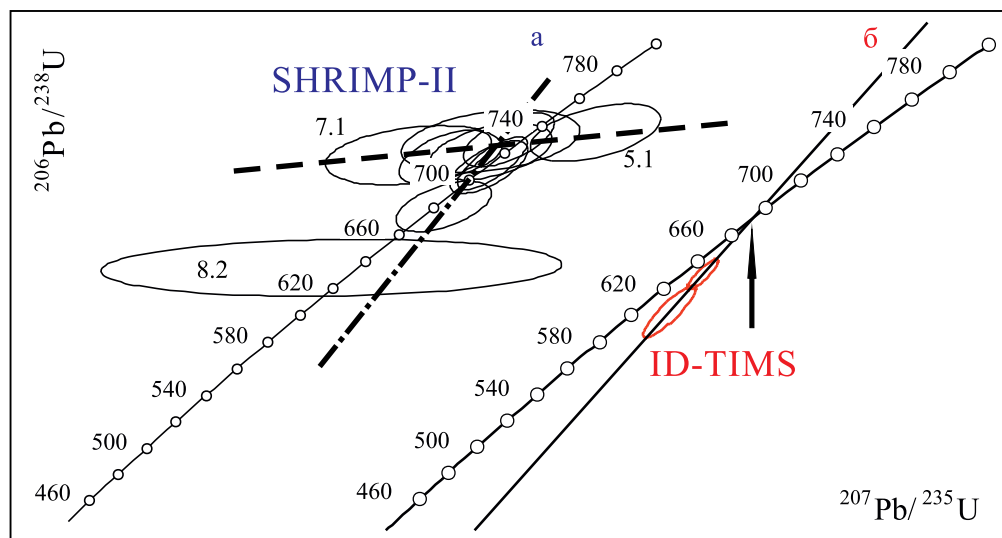


Рис. 7. Графики с конкордией для кристаллов циркона из гранитоидов Барангуловского массива, Южный Урал.

а – U-Pb SHRIMP II данные (n = 10); б – U-Pb ID-TIMS 673 ± 25 (95%-й дов. интервал) млн лет.

Fig. 7. U-Pb concordia diagramm for zircon crystals of the Barangul granitoids, Southern Urals.

а – U-Pb SHRIMP II data (n = 10); б – U-Pb ID-TIMS 673 ± 39 (95% conf. interval) Ma.

массив и др.), близкие к океаническим образованиям. Явно “чуждый” облик последних по отношению к преобладающей части осадочных и магматических образований рассматриваемой территории дают основания предполагать их аллохтонную природу.

Относительный возраст гранитоидов Барангуловского массива определяется их интрузивными взаимоотношениями с метатерригенными породами верхнерифейской мазаринской свиты (Стратиграфические схемы..., 1993). В первой половине и середине прошлого века возраст гранитоидов оценивался в широком возрастном диапазоне – от доордовикского/допалеозойского (Н.Н. Дингельштадт, Д.Г. Ожиганов) до нижне-, средне- или позднепалеозойского (Ю.Д. Смирнов, М.А. Гаррис, Г.И. Богатырева, В.И. Козлов и др.).

Датирование гранитоидов Барангуловского массива изотопными методами, выполненное рядом коллективов в разное время, характеризуется значительными вариациями опубликованных значений возрастов, от 340 млн лет (К-Аг метод (Гаррис, 1961; Богатырева, Козлов, 1972; Горожанин, 1995)) до 1800 млн лет (Pb-Pb метод (Рыкус и др., 2002)). Опубликованные (Краснобаев и др., 2007) U-Pb SHRIMP-II данные по цирконам габбро и гранитов, к сожалению, также не определяют однозначно изотопный возраст Барангуловского массива, более того, они вносят в рассматриваемую проблему еще большую неопределенность (рис. 7а).

Дело в том, что для U-Pb SHRIMP-II аналитических данных в табл. 1 в работе (Краснобаев и

др., 2007, с. 244) указаны погрешности на уровне $\pm 2\sigma$, хотя, судя по представленному здесь же графику с конкордией, неопределенность составляет $\pm 1\sigma$. Если принимать в расчетах заявленные авторами $\pm 2\sigma$ погрешности, то по приведенной совокупности данных для гранитов вообще невозможно рассчитать конкордантный возраст, поскольку при указанной неопределенности на графике в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ соответствующие эллипсы “разваливаются”. Это позволяет провести как минимум три дискордии, отражающие по одностадийной модели возраст (без учета точки 5.1) 700 ± 25 млн лет (СКВО = 0.78), а в случае принятия двухстадийной эволюции нижнее пересечение дискордии с конкордией определяет возраст 729 ± 21 млн лет, а верхнее – 2493 ± 2000 млн лет соответственно (см. рис. 7а). Таким образом, значительные аналитические погрешности, факт расположения фигуративных точек 3.1, 6.1, 9.1, 2.1, 3.2, 6.1, 7.1 и 8.2 выше конкордии и соответствующая дискордантность, достигающая –30%, существенно, если не принципиально, осложняют интерпретацию полученных авторами работы (Краснобаев и др., 2007) U-Pb SHRIMP-II возрастов. Иными словами, представленные U-Pb данные не позволяют однозначно ответить на ключевой вопрос, была ли U-Pb система изученных цирконов замкнутой или, напротив, открытой, что не дает возможности корректно оценить достоверность проведенного датирования. Следовательно, выводы авторов, что “основные этапы габбро- и гранитообразования разделяет интервал порядка 5 млн лет” (Крас-

нобаев и др., 2007, с. 245–246) при величине полученного возраста 725 ± 5 млн лет представляются по меньшей мере сомнительными.

В связи с этим нами было предпринято U-Pb датирование цирконов гранитоидов Барангуловского массива с помощью ID-TIMS метода. В результате получен U-Pb ID-TIMS возраст, отвечающий пересечению дискордии с линией согласованных значений (см. рис. 7б), равный 673 ± 25 млн лет. Сравнение U-Pb SHRIMP-II и ID-TIMS аналитических данных (см. рис. 7а, б соответственно) позволяет считать “резекцию” фигуративной точки 8.2 необоснованной, поскольку ее “дискордантное” положение выше конкордии явно замаскировано значительной аналитической погрешностью. Более того, U-Pb ID-TIMS данные, в противоположность положению точек 7.1 и 8.2 (см. рис. 7а), локализованы ниже дискордии; это дает основание предполагать, что наблюдаемая отрицательная дискордантность SHRIMP-II результатов является артефактом. Однако без проведения более точных U-Pb ID-TIMS измерений выявить это невозможно, в связи с чем авторы U-Pb SHRIMP-II датирования (Краснобаев и др., 2007) и удаляют фигуративную точку 8.2 из расчетов, считая ее “аномальной”.

Кумбинский габбро-норитовый массив Платиноносного пояса Урала

Еще одним показательным примером, выявляющим значимую разницу результатов U-Pb SIMS (Cameca IMS) и U-Pb ID-TIMS датирования, является сравнительное изучение U-Pb систематики цирконов габбро-норитов Кумбинского массива Платиноносного пояса Урала (Bosch et al., 2006). Детали внутреннего строения большинства массивов пояса изучены достаточно обстоятельно. Вопросы природы самого пояса, возрастной и геодинамической позиции, места и роли его в геологической истории и структуре Урала до сих пор остаются предметом острых дискуссий (Ферштатер, Пушкарев, 1992; Иванов, Калеганов, 1993; Ефимов и др., 1993, 2005, 2010; Малич и др., 2009). Рассматриваемый массив расположен в 20 км к северу от г. Североуральска и граничит на западе с верхнеордовикскими амфиболитами и плагиогранитами, а на востоке – с базальтовыми и андезитобазальтовыми порфиритами силура.

Выделенные из габбро-норитов цирконы представлены бесцветными прозрачными индивидами размером более 100 мкм (рис. 8а). Цирконы содержат включения и характеризуются как остроугольными, так и таблитчатыми окончаниями (рис. 8б), а также невыраженной внутренней структурой. Содержания U в них составляют от 200 до 2000 г/т. Результаты U-Pb SIMS (Cameca IMS) датирования цирконов Кумбинского массива представлены на рис. 9а. На графике с конкордией фигуративные эллипсы (как и в случае Барангуловского массива) демонстрируют случай, когда U-Pb данные, характеризуясь дискордантностью (от -2.58 до $+12.69$), локализованы вдоль конкордии с некоторым размахом (возрасты по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ варьируют от 387–433 до 397–431 млн лет соответственно), но при этом аналитические эллипсы взаимно перекрываются. Следуя логике формальной интерпретации, можно говорить о том, что исследованные цирконы имели достаточно определенную эволюцию (более 55 и 40 млн лет по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ соответственно). Более того, поскольку для всех U-Pb SIMS данных вероятность соответствия конкордантности равна нулю (СКВО = 12), то можно выделить два возрастных кластера: 400.9 ± 5.8 (СКВО = 1.3) и 416.6 ± 5.3 млн лет (СКВО = 1.18) с вероятностями соответствия 0.25 и 0.28 (см. рис. 9а, верхняя (I) и нижняя (II) вставки соответственно). Однако прецизионное U-Pb ID-TIMS датирование, выполненное по тем же цирконам, приводит к иным представлениям (рис. 9б).

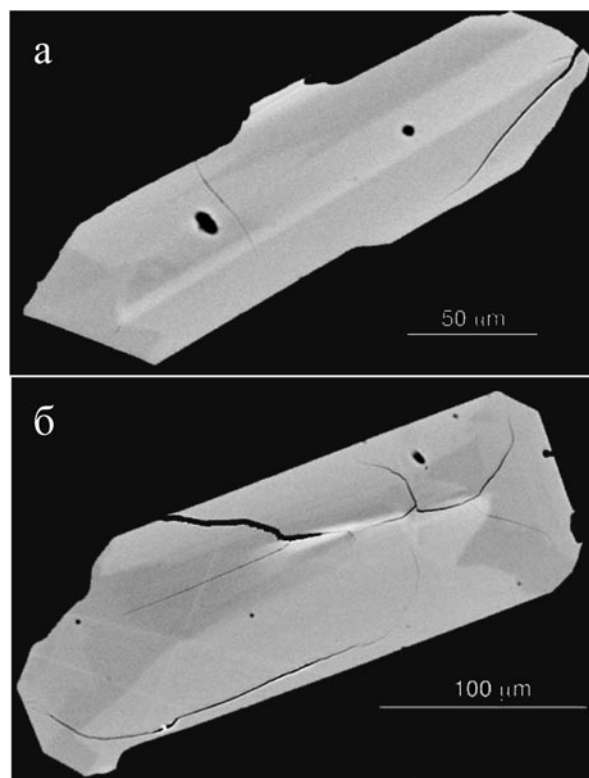


Рис. 8. Результаты изучения кристаллов циркона в обратноотраженных электронах из габбро-норита Кумбинского массива, Платиноносный пояс Урала (Bosch et al., 2006).

Fig. 8. The results of the study of zircon crystals in the back-scattered electron (BSE) from Kumba gabbro-norite massif, the Urals Platinum Belt (Bosch et al., 2006).

липсы (как и в случае Барангуловского массива) демонстрируют случай, когда U-Pb данные, характеризуясь дискордантностью (от -2.58 до $+12.69$), локализованы вдоль конкордии с некоторым размахом (возрасты по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ варьируют от 387–433 до 397–431 млн лет соответственно), но при этом аналитические эллипсы взаимно перекрываются. Следуя логике формальной интерпретации, можно говорить о том, что исследованные цирконы имели достаточно определенную эволюцию (более 55 и 40 млн лет по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ соответственно). Более того, поскольку для всех U-Pb SIMS данных вероятность соответствия конкордантности равна нулю (СКВО = 12), то можно выделить два возрастных кластера: 400.9 ± 5.8 (СКВО = 1.3) и 416.6 ± 5.3 млн лет (СКВО = 1.18) с вероятностями соответствия 0.25 и 0.28 (см. рис. 9а, верхняя (I) и нижняя (II) вставки соответственно). Однако прецизионное U-Pb ID-TIMS датирование, выполненное по тем же цирконам, приводит к иным представлениям (рис. 9б).

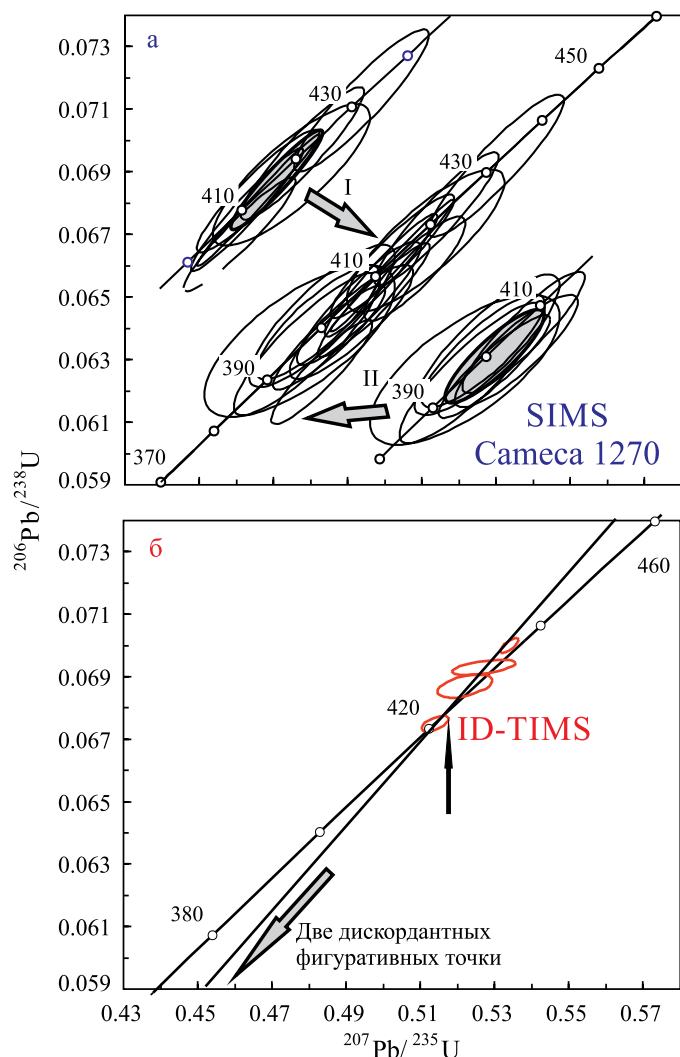


Рис. 9. U-Pb данные для циркона из габбро-норита Кумбинского массива, Платиноносный пояс Урала (Bosch et al., 2006).

а. SIMS (Cameca IMS), аналитические погрешности по осям координат $\pm 1\sigma$. Фигуративные эллипсы 16 кратеров локализируются вдоль конкордии с некоторым размахом (409.2 ± 4.5 млн лет, СКВО = 12, возрасты по отношениям $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ варьируют от 387–433 до 397–431 млн лет), характеризуясь вариациями величин дискордантности от -2.58 до $+12.69$. Вставки внизу иверху в том же масштабе отображают два возрастных кластера, определяющих возрасты 400.9 ± 5.8 млн лет (СКВО = 1.3) и 416.6 ± 5.3 млн лет (СКВО = 1.18) с вероятностями соответствия конкордантности 0.25 и 0.28 соответственно.

б. ID-TIMS. Фигуративные эллипсы 6 кристаллов соответствуют дискордии (СКВО = 0.36), верхнее пересечение которой с конкордией определяет возраст 425 ± 3 млн лет, вероятность соответствия 0.84. Для наглядности сравнения “а” и “б” представлены в одном масштабе.

Fig. 9. U-Pb concordia diagram for zircon from gabbro-norite Kumba massif of the Urals Platinum Belt (Bosch et al., 2006).

а. SIMS (Cameca IMS), the analytical uncertainties of the coordinate axes $\pm 1\sigma$. Figurative ellipses 16 craters are located along the Concordia with a certain scale (409.2 ± 4.5 million years MSWD = 12, ages by $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ range from 387–433 to 397–431 Ma), marked variations in the quantities discordance from -2.58 to $+12.69$. Insert the top and bottom, in the same scale, represent two age cluster, determine the age of 400.9 ± 5.8 Ma (MSWD = 1.3) and 416.6 ± 5.3 Ma (MSWD = 1.18) with the probability of the corresponding concordance of 0.25 and 0.28, respectively.

б. ID-TIMS. Figurative ellipses 6 crystals correspond to discordia (MSWD = 0.36), the upper intersection with concordia determines the age of 425 ± 3 Ma, probability of concordance 0.84. For better comparison of “а” and “б” are presented on the same scale.

На графике с конкордией шесть фигуративных точек цирконов образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией определяет возраст 425 ± 3 млн лет с высокой вероятностью соответствия 0.84, что практически совпадает с результатами ^{147}Sm – ^{143}Nd изохронного датирования (423 ± 18 млн лет) габбро-норитов и выделенным из них плагиоклаза, биотита и клинопироксена (Ронкин и др., 2003). Таким образом, сравнение U-Pb SIMS и ID-TIMS фактуры по одним и тем же цирконам вновь позволяет показать, насколько U-Pb SIMS датирование неоднозначно по сравнению с результатами U-Pb ID-TIMS и ^{147}Sm – ^{143}Nd ID-TIMS методов.

Мафические ксенолиты Южной Африки

Наконец, весьма показательными в контексте настоящей статьи являются результаты U-Pb датирования, в том числе сравнительного, ID-TIMS и SHRIMP-II методами цирконов из ксенолитов пород нижней коры, присутствующих среди образований кимберлитовой трубки Ласе, импактный

бассейн Vredefort, восток Каапваальского кратона (Moser et al., 2009). В этой работе после тщательно изучения минералогических особенностей с помощью электронного микроскопа (SEM-CL) авторами исследована U-Pb изотопная систематика цирконов с помощью ID-TIMS метода (с предварительным выполнением аэробразии) и SHRIMP-II одних и тех же кристаллов. Результаты для удобства сравнения представлены на графиках с конкордией в одном и том же масштабе (рис. 10). Анализ U-Pb данных (Moser et al., 2009) позволяет выявить следующее. Вариации коэффициентов дискордантности, характеризующих различие U-Pb возрастов, вычисленных по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, значительны и определяются диапазонами $+0.24 \dots +4.81$, $-5.0 \dots +10.8$ для ID-TIMS и SHRIMP-II данных соответственно. Однако в силу значимо больших погрешностей “in situ” анализа создается ложное впечатление о конкордантном положении эллипсов U-Pb SHRIMP-II данных. Подобное обстоятельство в случае отсутствия ID-TIMS результатов провоцирует на заведомо некорректный вывод

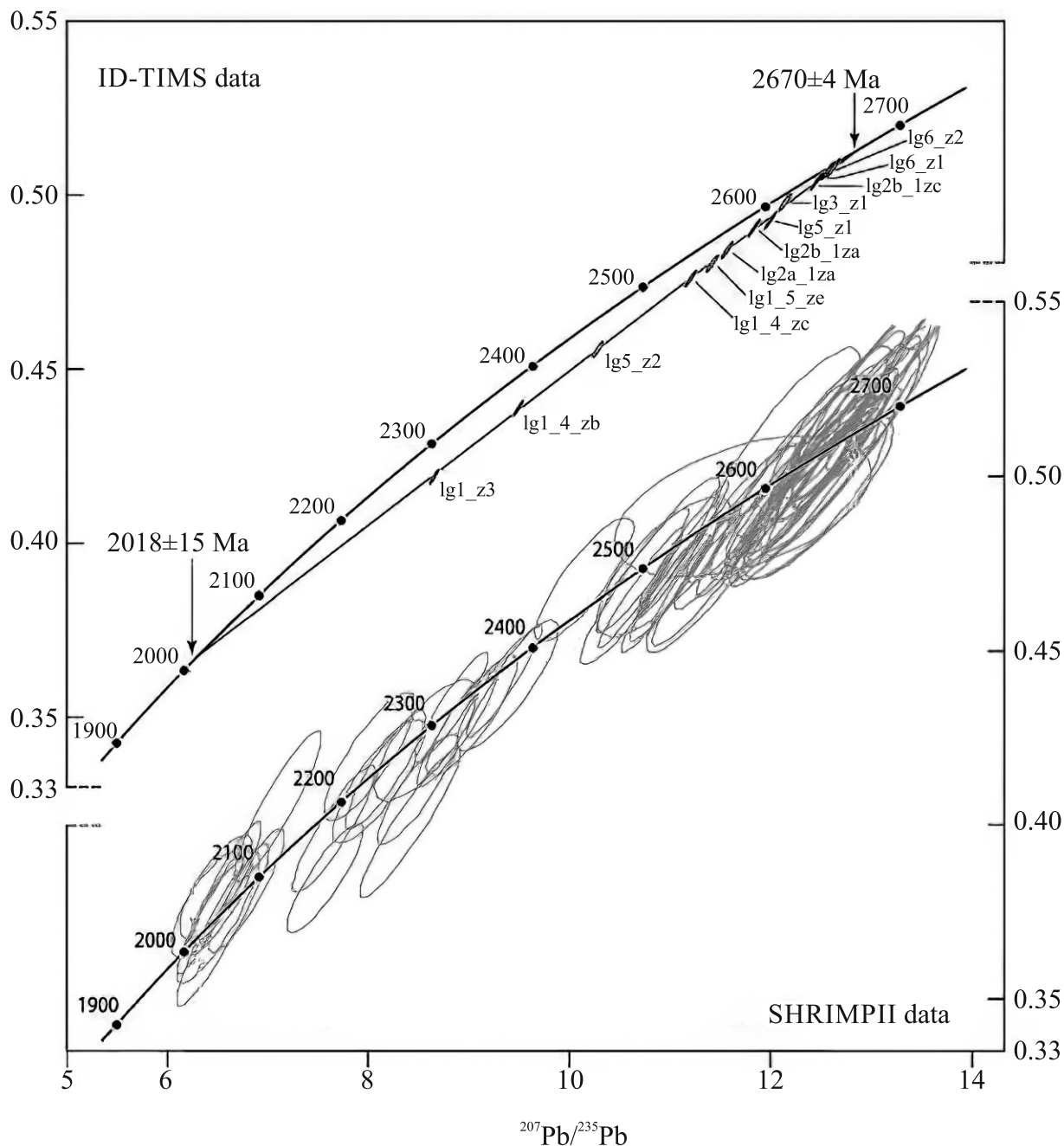


Рис. 10. U-Pb изотопная систематика цирконов из мафических ксенолитов Южной Африки (Moser et al., 2009), полученная с помощью ID-TIMS (после соответствующей аэроабразии) и SHRIMP-II одних и тех же кристаллов. Результаты представлены на графиках с конкордией в одном и том же масштабе.

Fig. 10. U-Pb isotope systematics of zircons from mafic xenoliths of South Africa (Moser et al., 2009), obtained by ID-TIMS (after appropriate air-abrasion) and SHRIMP-II of the same crystals.

The results are presented in graphs with concordia in the matching scale.

о наличии конкордантных возрастов в диапазоне от ≈ 2700 до ≈ 2000 млн лет с соответствующими геохронологическими выводами. Однако в данном случае благодаря наличию ID-TIMS данных выявляется реальная картина, отражающая нали-

чие четкой дискордии, верхнее и нижнее пересечение которой с конкордией отвечают U-Pb возрастам 2670 ± 4 и 2018 ± 15 млн лет соответственно.

В заключение в табл. 1 приводится краткое сравнение некоторых параметров описанных методов.

Таблица 1. Сравнение основных параметров U-Pb методов датирования циркона**Table 1.** Comparison of the basic parameters of U-Pb zircon dating methods

Метод датирования циркона	Сравнительные затраты	Сравнительное время анализа	Точность, %	Возможности	Проблемы
ID-TIMS / MC ICP-MS	Очень высокие	Значительное	До 0.05	Высокоточное датирование единичных эпизодов образования циркона. Создание геологической шкалы времени. Калибровка цирконовых стандартов для SHRIMP/SIMS и LA-ICP-MS анализа	Наличие специального стерильного производственного помещения, очищенных реагентов и перегонных аппаратов для их приготовления, тонкой хроматографии, калиброванных растворов, смешанного U-Pb спайка, изотопных стандартов, точных весов. Методологические проблемы с датированием полифазного циркона
SHRIMP / SIMS	Высокие	Среднее	2–5	Датирование нанообъемов (2 нг и менее за анализ) в пределах одного кристалла. Малая глубина кратера. Предварительное изучение цирконов для последующего ID-TIMS анализа. Датировка ядер и оболочек. Датирование детритовых цирконов. Определение закономерностей профильного распределения концентраций Pb, U и Th	Точность ниже статистических погрешностей, что часто обуславливает появление артефактов при интерпретации U-Pb цирконовых данных. Неопределенность датирования при калибровке геохронологической шкалы, а также попытках датировать сближенные во времени геологические события. Наличие цирконовых стандартов, подобных как по возрасту, так и по матрице исследуемому циркону. Влияние матричных эффектов. Проблемы с датированием высокоурановых цирконов

ВЫВОДЫ

В настоящее время изучение U-Pb систематики циркона осуществляется как классическим способом – ID-TIMS (ID-MC-ICP/MS), так и методами локального датирования (SIMS и LA ICP/MS). Поскольку основы рассматриваемых методов датирования фундаментально различаются, каждому из них присущи свои преимущества и недостатки.

Так называемые “классические” U-Pb ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS методы позволяют получить беспрецедентную на сегодня точность датирования как единичных кристаллов циркона, так и их фрагментов, однако претворение этих методик относительно трудоемко и дорогостояще. Кроме того, известные методологические трудности вызывает датирование этими методами полифазного гетерогенного циркона, требующего реализации физической и химической сепарации.

U-Pb SIMS метод дает возможность датировать нанообъемы в пределах одного кристалла, что позволяет исследовать отдельные области и домены. Данное обстоятельство важно при дефиците исходного материала (единичные акцессории из уникального материала, метеоритов и тому подобных веществ). Другими возможностями является высокопроизводительное U-Pb SIMS датирование многих сотен и тысяч детритовых цирконов, поскольку этот способ датирования, несмотря на сравнительно меньшую точность, поддерживает одно из важнейших направлений в исследовании транспортировки обломочного вещества при процес-

сах осадконакопления, а также определение закономерностей профильного распределения концентрационных градиентов Pb, U и Th исследуемых кристаллов.

Основным недостатком U-Pb SIMS метода является значительная, на порядок и более, погрешность U-Pb датирования в сравнении с ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS, “маскирующая” возможные потери Pb (и/или привнос U), обуславливающая возникновение артефактов при интерпретации U-Pb цирконовых данных. Это, в свою очередь, приводит к выделению несуществующих этапов магматизма, метаморфизма, ложным представлениям о длительной эволюции изучаемых геологических объектов и т. д. Наиболее значима неопределенность U-Pb SIMS датирования при использовании этого инструментария для калибровки геохронологической шкалы, а также при попытках датировать сближенные во времени геологические события. Более того, при получении U-Pb SIMS возрастных данных, носящих сенсационный характер, авторы часто пребывают в уверенности, что ими решена соответствующая прямая геохронологическая задача. Однако с появлением по этому же объекту U-Pb ID-TIMS данных, показывающих иные временные закономерности, результаты U-Pb SIMS датирования часто начинают рассматривать в качестве основы для решения обратной геохронологической задачи. В этом случае SIMS результаты, отличающиеся от U-Pb ID-TIMS данных, начинают интерпретировать как датировки, отражающие процессы “омоложения”, “удревне-

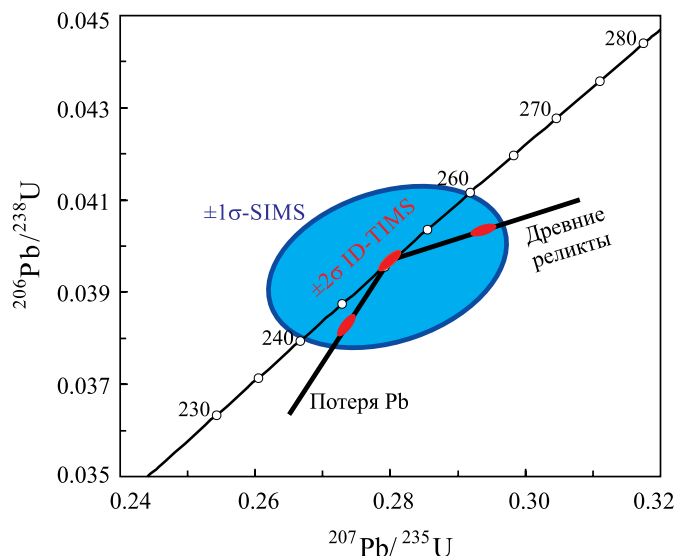


Рис. 11. Сравнение погрешностей U-Pb SIMS и U-Pb ID-TIMS датирования циркона пермского возраста (Claoue-Long, Zhang, 1991; Bowring, Schmitz, 2003; Ронкин и др., 2009).

Площадь эллипса, полученного с помощью U-Pb SIMS метода (закрашено синим цветом), может служить геометрическим местом для локализации множества фигуративных точек, определенных с помощью более разрешающих U-Pb ID-TIMS измерений (красные эллипсы).

Fig. 11. Comparison of uncertainties U-Pb SIMS and U-Pb ID-TIMS dating of Permian zircon (Claoue-Long, Zhang, 1991; Bowring, Schmitz, 2003; Ronkin et al., 2009).

Area particular ellipse obtained by U-Pb SIMS method (blue color) can serve as a locus for the localization of a many data points defined by more accurate U-Pb ID-TIMS measurement (red ellipses).

ния" (вследствие наличия унаследованного, ксеногенного материала), в то время как интригующие вариации SIMS данных от реперных (т. е. действительных) значений возраста являются всего лишь следствием неконтролируемых погрешностей.

Подводя итог сравнительному рассмотрению погрешностей U-Pb SIMS и ID-TIMS датирования цирконов различных геологических объектов, необходимо отметить общую закономерность, проявляющуюся в том, что на графиках с конкордией площадь конкретного эллипса, полученного с помощью U-Pb SIMS метода, может служить геометрическим местом для локализации множества фигуративных точек (рис. 11), определенных с помощью U-Pb ID-TIMS (Claoue-Long, Zhang, 1991; Compston, 1999; Bowring, Schmitz, 2003; Ронкин и др., 2009). Иными словами, при U-Pb SIMS датировании часто складывается ситуация, когда положение фигуративной точки на графике с конкордией не может быть однозначно определено как конкор-

дантное или дискордантное (см. рис. 11), что наиболее ярко проявляется в случае сближенных во времени геологических событий. Отсюда велика вероятность возникновения артефактов при интерпретации реальных геологических процессов, датированных с помощью U-Pb SIMS.

Изложенные аргументы справедливы и для U-Pb LA ICP/MS, где аналитические погрешности значимо больше, чем в случае SIMS (Claoue-Long, Zhang, 1991; Bowring, Schmitz, 2003; Kosler, Sylvester, 2003; Ронкин и др., 2009).

Применение U-Pb SIMS методов датирования цирконов должно быть ограничено решением геологических задач, не требующих высокой точности датирования (т. е. допускающих определение возраста оценочного характера), но связанных с необходимостью изучения большого числа образцов и соответствующего количества зерен циркона. Такой задачей, как уже говорилось ранее, является изучение обломочных цирконов в целях реконструкции источников и геологии условий формирования осадочных бассейнов. Другими задачами, адекватными возможностям U-Pb SIMS методов, при решении которых этот метод может использоваться, может быть изучение гетерогенности кристаллов циркона сложного строения и предварительный отбор материала для последующего высокоточного датирования U-Pb ID-TIMS и/или ID-MC-ICP/MS методами. Расширение числа лабораторий, практикующих эти высокоточные методы, представляется важнейшим направлением развития отечественной изотопной геохронологии.

Благодарности

Авторы признательны академику И.В. Чернышеву за предложение рассмотреть данную проблему и критические замечания по сути рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.А. (1984) Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. М.: Наука, 136 с.
Алексеев А.А. (1976) Магматические комплексы зоны хребта Урал-Тау. М.: Наука, 170 с.
Богатырева Г.И., Козлов В.И. (1972) Петрографическая и петрохимическая характеристика интрузивных пород антиклинория Урал-Тау в Тирляномском районе на Южном Урале. *Материалы по геологии и полезным ископаемым Южного Урала*. Вып. 5. Уфа: Башк. кн. изд-во, 76-86.
Васильева И.М., Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Горохов И.М., Крупенин М.Т., Маслов А.В., Гороховский Б.М. (2009) Pb-Pb возраст среднерифейских фосфоритовых конкреций (зигазино-комаровская свита Южного Урала). *Изотопные системы и время геологических процессов. Материалы IV Рос. конф. по изотопной геохронологии*. Т. I. СПб.: ИП Каталкина, 99-101.
Гаррис М.А. (1961) Геохронология магматических и метаморфических пород Южного Урала и Мугоджар по данным калий-аргонового метода. *Материалы по*

- геологии и полезным ископаемым Урала. Вып. 8. М.: Госгеолтехиздат, 127-135.
- Горожанин В.М. (1995) Rb-Sr метод в решении проблем геологии Южного Урала. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 23 с.
- Ефимов А.А., Ефимова Л.П., Маегов В.И. (1993) Тектоника Платиноносного пояса Урала: соотношение вещественных комплексов и механизм формирования структуры. *Геотектоника*, **3**, 34-46.
- Ефимов А.А., Ронкин Ю.Л., Зиндерн С., Крамм У., Лепихина О.П., Попова О.Ю. (2005) U-Pb данные по цирконам плагиигранитов Кытлымского массива: изотопный возраст поздних событий в истории Платиноносного пояса Урала. *Докл. АН*, **403**(4), 512-516.
- Ефимов А.А., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. (2010) Гранитоидный магматизм и водный метаморфизм в истории Платиноносного пояса Урала: Sm-Nd (ID-TIMS) изотопные ограничения. *Докл. АН*, **435**(6), 770-775.
- Иванов О.К., Калеганов Б.А. (1993) Новые данные о возрасте концентрически-зональных дунит-пироксенитовых массивов платиноносного пояса Урала. *Докл. АН*, **328**(6), 720-724.
- Иванов С.Н., Пучков В.Н., Иванов К.С., Самаркин Г.И., Семенов И.В., Пумпянский А.И., Дымкин А.М., Полтавец Ю.А., Русин А.И., Краснобаев А.А. (1986) Формирование земной коры Урала. М.: Наука, 248 с.
- Козлов В.И., Краснобаев А.А., Ларионов Н.Н., Маслов А.В., Сергеева Н.Д., Бибилова Е.В. Генина Л.А., Ронкин Ю.Л. (1989) Нижний рифей Южного Урала. М.: Наука, 208 с.
- Краснобаев А.А., Бибилова Е.В., Степанов А.И., Кирнозова Т.И., Ронкин Ю.Л., Макаров В.А., Лепихина О.П., Кравцов А.В. (1985) Возраст эффузивов машакской свиты и проблема изотопно-геохронологической границы нижний-средний рифей. *Изотопное датирование процессов вулканизма и осадкообразования*. М.: Наука, 162-175.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н. и др. (2008) Машакский вулканизм: ситуация 2008. *Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики докембрия фанерозойских орогенов. Мат-лы III Чтений памяти С.Н. Иванова. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН*, 61-63.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Бушарина С.В. (2013) Цирконовая геохронология машакских вулканитов и возраст границы нижнего-среднего рифея (Южный Урал). *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **21**(5), 3-20.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Ларионов А.Н., Нехорошева А.Г., Бережная Н.Г. (2007) Полигенно-полихронная цирконология и проблема возраста Барангуловского габбро-гранитного комплекса. *Докл. АН*, **416**(2), 241-246.
- Макеев А.Ф., Левский Л.К. (2006) Возможности и ограничения ионных микрозондов при измерении свинца и урана. *Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. Мат-лы III Рос. конф. по изотопной геохронологии*. Т. 2. М.: ГЕОС, 12-15.
- Малич К.Н., Ефимов А.А., Ронкин Ю.Л. (2009) Архейский U-Pb-изотопный возраст Нижнетагильского массива (Платиноносный пояс Урала). *Докл. АН*, **427**(1), 101-105.
- Маслов А.В. (1994) Осадочные комплексы в разрезах рифтогенных структур. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 176 с.
- Маслов А.В., Ронкин Ю.Л. (2008) О некоторых новых данных по возрасту магматических образований в типовом разрезе рифея. *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. Мат-лы VII межрегион. геол. конф.* Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 120-122.
- Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Горохов И.М., Крупенин М.Т., Гороховский Б.М., Маслов А.В. (2013) Pb-Pb-возраст и Sr-изотопная характеристика среднерифейских фосфоритовых конкреций: зигазино-комаровская свита южного Урала. *Докл. АН*, **451**(4), 430.
- Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция. (2004) Отв. ред. Ю.Г. Леонов, Ю.А. Волож. М.: Научн. мир, 526 с.
- Парначев В.П. (1988) Магматизм и осадконакопление в позднедокембрийской истории Южного Урала. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 33 с.
- Парначев В.П., Ротарь А.Ф., Ротарь З.М. (1986) Среднерифейская вулканогенно-осадочная ассоциация Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 104 с.
- Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Козлов В.И., Матуков Д.И., Нехорошева А.Г., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. (2007) Предварительные данные о возрастных рубежах нео-и мезопротерозоя Южного Урала в свете новых U-Pb датировок. *Геологический сборник № 6 ИГ УНЦ РАН*. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 3.
- Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Шмитц М., Козлов В.И., Давыдов В.И., Лепехина Е.Н., Нехорошева А.Г. (2009) Новые U-Pb датировки вулканитов машакской свиты рифея Южного Урала и их сравнительная оценка. *Геологический сборник № 8 ИГ УНЦ РАН*. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 3-14.
- Ронкин Ю.Л., Ефимов А.А., Лепихина О.П. (2009) Артефакты при U-Pb SIMS датировании циркона. Арбитражное сравнение с прецизионными U-Pb ID-TIMS и данными иных изотопных систем. *Ежегодник-2008*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 337-343.
- Ронкин Ю.Л., Иванов К.С., Шмелев В.Р., Лепихина О.П. (2003) Sm-Nd изотопное датирование габбро-норита Кумбинского массива: Платиноносный пояс Урала. *Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. Мат-лы II Рос. конф. по геохронологии*. СПб.: ИГГД РАН, 424-427.
- Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Казак А.П., Матуков Д.И., Лепихина О.П. (2007а) Граница нижнего и среднего рифея на Южном Урале: новые изотопные U-Pb SHRIMP-II ограничения. *Докл. АН*, **415**(3), 370-378.
- Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Матуков Д.И., Лепихина О.П., Попова О.Ю. (2005) "Машакское рифтогенное событие" рифея типовой области (Южный Урал): новые изотопно-геохронологические рамки. *Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере. Мат-лы XI Междунар. конф.* Сыктывкар: Геопринт, 305-307.
- Ронкин Ю.Л., Синдерн С., Маслов А.В., Матуков Д.И., Крамм У., Лепихина О.П. (2007б) Древнейшие (3.5 млрд лет) цирконы Урала: U-Pb (SHRIMP-II) и T_{DM} ограничения. *Докл. АН*, **415**(5), 651-657.
- Ронкин Ю.Л., Тихомирова М., Маслов А.В. (2016) ~1380 млн лет LIP Южного Урала: прецизионные U-Pb ID-TIMS ограничения. *Докл. АН*, **468**(6), 674-679.

- Рыкус М.В., Сначёв В.И., Насибуллин Р.А., Рыкус Н.Г., Савельев Д.Е. (2002) Осадконакопление, магматизм и рудоносность северной части зоны Уралтау. Уфа: Изд-во БГУ, 268 с.
- Семихатов М.А. (2000) Уточнение оценок изотопного возраста нижних границ верхнего рифея, венда, верхнего венда и кембрия. Дополнения к стратиграфическому кодексу России. СПб.: ВСЕГЕИ, 95-107.
- Семихатов М.А., Шуркин К.А., Аксенов Е.М., Беккер Ю.Р., Бибикина Е.В., Дук В.Л., Есипчук К.Е., Карсаков Л.П., Киселев В.В., Козлов В.И., Лобач-Жученко С.Б., Негруца В.З., Робонен В.И., Сёзко А.И., Филатова Л.И., Хоментовский В.В., Шемякин В.М., Шульдинер В.И. (1991) Новая стратиграфическая шкала докембрия СССР. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, **8**, 3-14.
- Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). (1993) Екатеринбург: Роскомнедра; ИГГ УрО РАН, 151 л.
- Ферштатер Г.Б., Пушкарев Е.В. (1992) Магматические клинопироксениты Урала и их эволюция *Изв. РАН. Сер. геол.*, **4**, 74-84.
- Andersen C.A., Hinthorne J.R. (1972) U, Th, Pb and REE abundances and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of individual minerals in returned lunar material by ion microprobe mass analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **14**, 195-200.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen S.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. (2003a) TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, **200**(1-2), 155-170.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. (2004) Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chem. Geol.*, **205**, 115-140.
- Black L.P., Kamo S.L., Williams I.S., Mundil R., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. (2003b) The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology; a critical appraisal of four zircon standards. *Chem. Geol.*, **200**(1-2), 171-188.
- Boekhout F., Spikings R., Sempere T., Chiaradia M., Ulianov A., Schaltegger U. (2012) Mesozoic arc magmatism along the southern Peruvian margin during Gondwana breakup and dispersal. *Lithos.*, **146-147**, 48-64.
- Boltwood B.B. (1907) On the ultimate disintegration products of the radioactive elements. Pt II. The disintegration products of uranium. *Amer. J. Sci.*, **23**, 77-88.
- Bosch D., Bruguier O., Efimov A., Krasnobaev A. (2006) A Middle Silurian age for the Uralian Platinum-bearing Belt (Central Urals, Russia): U-Pb zircon evidence and geodynamic implication. *Geol. Soc. London. Mem.*, **32**, 443-448.
- Bowring S.A., Schoene B., Crowley J.L., Ramezani J., Condon D.C. (2006) High-Precision U-Pb zircon geochronology and the stratigraphic record: progress and promise. *Geochronology: Emerging Opportunities, Paleontological Society Short Course*, **12**. Philadelphia, PA, The Paleontol. Soc., 25-45.
- Bowring S.A., Williams I.S. (1999) Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**, 3-16.
- Bowring S.A., Schmitz M.D. (2003) High-Precision U-Pb Zircon Geochronology and the Stratigraphic Record. *Zircon. Rev. Miner.*, **53**, 305-326.
- Claoue-Long J.C., Zhang Z.C., Ma G.G., and Du S.I. (1991) The age of the Permian-Triassic boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **105**, 182-190.
- Compston W. (1999) Geological age by instrumental analysis: the 29th Hallimond Lecture. *Miner. Mag.*, **63**, 297-311.
- Condon D.J., Schoene B., McLean N.M., Bowring S.A., Parrish R. (2015) Metrology and traceability of U-Pb isotope dilution geochronology (EARTHTIME Tracer Calibration. Pt I). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **164**, 464-480.
- Davis D.W., Poulsen K.H., Kamo S.L. (1989) New insights into Archean crustal development from geochronology in the Rainy Lake area, Superior Province, Canada. *J. Geol.*, **97**, 379-398.
- Davis D.W., Williams I.S., Krogh T.E. (2003) Historical development of zircon geochronology. *Zircon. Rev. Miner.*, **53**, 145-181.
- Dunphy J.M., Fletcher I.R., Cassidy K.F., Champion D.C. (2003) Compilation of SHRIMP U-Pb geochronological data, Yilgarn Craton, Western Australia, 2001-2002. *Geosci. Australia*, **15**, 139.
- Einsele G. (1992) Sedimentary basins. Evolution, facies and sediment budget. Berlin, Springer, 628 p.
- Ernst R.E., Wingate M.T.D., Buchan K.L., Li Z.X. (2008) Global record of 1600-700 Ma Large Igneous Provinces (LIPs): Implications for the reconstruction of the proposed Nuna (Columbia) and Rodinia supercontinents. *Prec. Res.*, **160**, 159-178.
- Goode J.W., Myrow P., Williams I.S., Bowring S.A. (2002) Age and provenance of the Beardmore Group, Antarctica: Constraints on Rodinia supercontinent breakup. *J. Geol.*, **110**, 393-406.
- Ireland T.R. (1995) Ion microprobe mass spectrometry: Techniques and applications in cosmochemistry, geochemistry, and geochronology. *Advances in Analytical Geochemistry*, **2**, 1-118.
- Ireland T.R., Flöttmann T., Fanning C.M., Gibson G.M., Preiss W.V. (1998) Development of the lower-Paleozoic Pacific margin of Gondwana from zircon-age structure across the Delamerian orogen. *Geology*, **26**, 243-246.
- Ireland T.R., Williams I.S. (2003) Considerations in Zircon Geochronology by SIMS. *Zircon. Rev. Miner.*, **53**, 215-241.
- Ireland T.R., Wlotzka F. (1992) The oldest zircons in the solar system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **109**, 1-10.
- Jackson S., Pearson N., Griffin W., Belousova E. (2004) The application of laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, **211**, 47-69.
- Jaffey A.H., Flynn K.F., Glendenin L.E., Bentley W.C., Essling A.M. (1971) Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U . *Phys. Rev. C*, **4**(5), 1889-1906.
- Keeley J.A., Link P.K., Fanning C.M., Schmitz M.D. (2012) Pre- to synglacial rift-related volcanism in the Neoproterozoic (Cryogenian) Pocatello Formation, SE Idaho: New SHRIMP and CA-ID-TIMS constraints. *Lithosphere*, **5**(1), 128-150.
- Keevil N.B. (1939) The calculation of geologic age. *Amer. J. Sci.*, **237**, 195-214.
- Kennedy A.K., Wotzlaw J.F., Crowley J., Schmitz M., Schaltegger U. (2014) Eocene reference material for microanalysis of U-Th-Pb isotopes and trace elements. *Can. Mineral.*, **52**, 409-421.
- Kosler J., Sylvester P.J. (2003) Present trends and the future of zircon in geochronology: laser ablation ICP/MS. *Zircon. Rev. Miner.*, **53**, 244-275.

- Krogh T.E. (1982) Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 637-649.
- Krogh T.E., Davis G.L. (1975) Alteration in zircons and differential dissolution of altered and metamict zircon. *Year Book 74*. Carnegie Institution. Washington, 619-623.
- Lee J.K.W., Williams I.S., Ellis D.J. (1997) Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, **390**, 159-162.
- Mattinson J.M. (2005) Zircon U-Pb chemical abrasion ("CA-TIMS") method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. *Chem. Geol.*, **220**, 47-66.
- Meyer C., Williams I.S., Compston W. (1996) Uranium-lead ages for lunar zircons: Evidence for a prolonged period of granophyre formation from 4.32 to 3.88 Ga. *Meteor. Planet. Sci.*, **31**, 370-387.
- Moser D.E., Davis W.J., Reddy S.M., Flemming R.L., Hart R.J. (2009) Zircon U-Pb strain chronometry reveals deep impact-triggered flow. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **277**(1-2), 73-79.
- Mundil R., Metcalfe I., Ludwig K.R., Ronne P.R., Oberli F., Nicoll R.S. (2001) Timing of the Permian-Triassic biotic crisis: implications from new zircon U/Pb age data (and their limitations). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **187** 131-145.
- Paces J.B., Miller J.D. (1993) Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota – geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga Midcontinent rift system. *J. Geophys. Res.* **98**(B8), 13997-14013.
- Puchkov V.N., Bogdanova S.V., Ernst R.E., Kozlov V.I., Krasnobaev A.A., Söderlund U., Wingate M.T.D. (2013) The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals. *Lithos*, **174**, 109-124.
- Schaltegger U.A., Schmitt K., Horstwood M.S.A. (2015) U-Th-Pb zircon geochronology by ID-TIMS, SIMS, and laser ablation ICP/MS: Recipes, interpretations, and opportunities. *Chem. Geol.*, **402**, 89-110.
- Schmitz M.D., Kuiper K.F. (2013) High-precision geochronology. *Elements*, **9**(1), 25-30.
- Schoene B. (2014) 4.10 U-Th-Pb Geochronology. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Oxford, Elsevier, 341-378.
- Schoene B., Crowley J., Condon D., Schmitz M., Bowring S. (2006) Reassessing the uranium decay constants for geochronology using ID-TIMS U-Pb data. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 426-445.
- Sircombe K.N. (1997) Detrital mineral SHRIMP geochronology and provenance analysis of sediments in Eastern Australia. PhD dissertation. Australian National University. Canberra, 312 p.
- Sircombe K.N. (1999) Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia. *Sediment. Geol.*, **124**, 47-67.
- Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse, M.J. (2008) Plešovice zircon – a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1-35.
- Tilton G.R., Patterson C.C., Brown H., Inghram M., Hayden R., Hess D., Larsen Jr. E. (1955) Isotopic composition and distribution of lead, uranium, and thorium in a Precambrian granite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **66**, 1131-1148.
- Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. (1995) Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. Newslett.*, **19**, 1-23.
- Wilde S.A., Valley J.W., Peck W.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.
- Williams I.S. (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Eds M.A. McKibben, W.C. Shanks III, W.I. Ridley. *Rev. Econ. Geol.*, **7**, 1-35.
- Alekseev A.A. (1984) *Rifeisko-vendskii magmatizm zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala* [Riphean-Vendian magmatism of the western slope of the Southern Urals]. Moscow, Nauka Publ., 136 p. (In Russian)
- Alekseev A.A. (1976) *Magmaticheskie komplekсы khrebtá Ural-Tau* [Magmatic complexes of the Ural-Tau Range]. Moscow, Nauka Publ., 170 p. (In Russian)
- Andersen C.A., Hinthorne J.R. (1972) U, Th, Pb and REE abundances and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of individual minerals in returned lunar material by ion microprobe mass analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **14**, 195-200.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen S.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. (2003a) TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, **200**(1-2), 155-170.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. (2004) Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chem. Geol.*, **205**, 115-140.
- Black L.P., Kamo S.L., Williams I.S., Mundil R., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. (2003b) The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology; a critical appraisal of four zircon standards. *Chem. Geol.*, **200**(1-2), 171-188.
- Boekhout F., Spikings R., Sempere T., Chiaradia M., Ulianov A., Schaltegger U. (2012) Mesozoic arc magmatism along the southern Peruvian margin during Gondwana breakup and dispersal. *Lithos*, **146-147**, 48-64.
- Bogatyrev G.I., Kozlov V.I. (1972) Petrographic and petrochemical characteristics of the intrusive rocks of the anticlinorium Ural-Tau in the Tyrylansky region of the Southern Urals. *Materialy po geologii i poleznym iskopayemym Yuzhnogo Urala* [Materials on Geology and minerals of the Southern Urals]. V. 5. Ufa, Bash. Knizhn. Izdat. Publ., 76-86. (In Russian)
- Boltwood B.B. (1907) On the ultimate disintegration products of the radioactive elements. Pt II. The disintegration products of uranium. *Amer. J. Sci.*, **23**, 77-88.
- Bosch D., Bruguier O., Efimov A., Krasnobaev A. (2006) A Middle Silurian age for the Uralian Platinum-bearing Belt (Central Urals, Russia): U-Pb zircon evidence and geodynamic implication. *Geol. Soc. London. Mem.*, **32**, 443-448.
- Bowring S.A., Schmitz M.D. (2003) High-Precision U-Pb Zircon Geochronology and the Stratigraphic Record. *Zircon. Rev. Miner.*, **53**, 305-326.
- Bowring S.A., Schoene B., Crowley J.L., Ramezani J., Condon D.C. (2006) High-precision U-Pb zircon geochronology

- nology and the stratigraphic record: progress and promise. *Geochronology: Emerging Opportunities, Paleontological Society Short Course*, **12**. Philadelphia, PA, The Paleontol. Soc., 25-45.
- Bowring S.A., Williams I.S. (1999) Priscoan (4.00–4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**, 3-16.
- Claoue-Long J.C., Zhang Z.C., Ma G.G., and Du S.I. (1991) The age of the Permian-Triassic boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **105**, 182-190.
- Compston W. (1999) Geological age by instrumental analysis: the 29th Hallimond Lecture. *Miner. Mag.*, **63**, 297-311.
- Condon D.J., Schoene B., McLean N.M., Bowring S.A., Parrish R. (2015) Metrology and traceability of U-Pb isotope dilution geochronology (EARTHTIME Tracer Calibration. Pt. I). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **164**, 464-480.
- Davis D.W., Poulsen K.H., Kamo S.L. (1989) New insights into Archean crustal development from geochronology in the Rainy Lake area, Superior Province, Canada. *J. Geol.*, **97**, 379-398.
- Davis D.W., Williams I.S., Krogh T.E. (2003) Historical development of zircon geochronology. *Zircon. Rev. Miner.*, **53**, 145-181.
- Dunphy J.M., Fletcher I.R., Cassidy K.F., Champion D.C. (2003) Compilation of SHRIMP U-Pb geochronological data, Yilgarn Craton, Western Australia, 2001-2002. *Geosci. Australia*, **15**, 139 p.
- Efimov A.A., Efimova L.P., Maegov V.I. (1993) Tectonics of the Urals Platinum Belt: the ratio of real complexes and the mechanism of structure formation. *Geotektonika*, **3**, 34-46. (In Russian)
- Efimov A.A., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P. (2010) Granitoid magmatism and water metamorphism in the history of the Ural Platinum Belt: Sm-Nd (ID-TIMS) isotopic limitations. *Dokl. Akad. Nauk*, **435**(6), 770-775. (In Russian)
- Efimov A.A., Ronkin Yu.L., Sindern S., Kramm U., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. (2005) U-Pb data on zircons of plagiogranites of the Kytlym massif: isotopic age of later events in the history of the Ural Platinum Belt. *Dokl. Akad. Nauk*, **403**(4), 512-516. (In Russian)
- Einsele G. (1992) Sedimentary basins. Evolution, facies and sediment budget. Berlin, Springer, 628 p.
- Ernst R.E., Wingate M.T.D., Buchan K.L., Li Z.X. (2008) Global record of 1600–700 Ma Large Igneous Provinces (LIPs): Implications for the reconstruction of the proposed Nuna (Columbia) and Rodinia supercontinents. *Prec. Res.*, **160**, 159-178.
- Fershtater G.B., Pushkarev E.V. (1992) Igneous clinopyroxenites of the Urals and their evolution *Izv. Akad. Nauk. Ser. Geol.*, **4**, 74-84. (In Russian)
- Garris M.A. (1961) Geochronology of igneous and metamorphic rocks of the Southern Urals and Mugodzhar according to the potassium-argon method. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Urala* [Materials on geology and minerals of the Urals]. Iss. 8. M.: Gosgeoltekhizdat Publ., 127-135. (In Russian)
- Goodge J.W., Myrow P., Williams I.S., Bowring S.A. (2002) Age and provenance of the Beardmore Group, Antarctica: Constraints on Rodinia supercontinent breakup. *J. Geol.*, **110**, 393-406.
- Gorozhanin V.M. (1995) *Rb-Sr metod v reshenii problem geologii Yuzhnogo Urala*. Avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk [Rb-Sr method in solving the problems of geology of the Southern Urals. Kand. geol. and min. sci. diss.]. Ekaterinburg, IGG UB of RAS, 23 p. (In Russian)
- Ireland T.R. (1995) Ion microprobe mass spectrometry: Techniques and applications in cosmochemistry, geochemistry, and geochronology. *Advances in Analytical Geochemistry*, **2**, 1-118.
- Ireland T.R., Flöttmann T., Fanning C.M., Gibson G.M., Preiss W.V. (1998) Development of the lower-Paleozoic Pacific margin of Gondwana from zircon-age structure across the Delamerian orogen. *Geology*, **26**, 243-246.
- Ireland T.R., Williams I.S. (2003) Considerations in Zircon Geochronology by SIMS. *Zircon. Rev. Miner.*, **53**, 215-241.
- Ireland T.R., Wlotzka F. (1992) The oldest zircons in the solar system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **109**, 1-10.
- Ivanov O.K., Kaleganov B.A. (1993) New data on the age of concentric-zonal dunite-pyroxenite massifs of the Ural platinum-bearing belt. *Dokl. Akad. Nauk*, **328**(6), 720-724. (In Russian)
- Ivanov S.N., Puchkov V.N., Ivanov K.S., Samarkin G.I., Semenov I.V., Pumpysky A.I., Dymkin A.M., Poltavets Yu.A., Rusin A.I., Krasnobaev A.A. (1986) *Formirovanie zemnoi kory Urala* [Formation of the crust of the Urals]. Moscow, Nauka Publ., 248 p. (In Russian)
- Jackson S., Pearson N., Griffin W., Belousova E. (2004) The application of laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, **211**, 47-69.
- Jaffey A.H., Flynn K.F., Glendenin L.E., Bentley W.C., Essling A.M. (1971) Precision measurement of half-lives and specific activities of ²³⁵U and ²³⁸U. *Phys. Rev. C*, **4**(5), 1889-1906.
- Keeley J.A., Link P.K., Fanning C.M., Schmitz M.D. (2012) Pre-to synglacial rift-related volcanism in the Neoproterozoic (Cryogenian) Pocatello Formation, SE Idaho: New SHRIMP and CA-ID-TIMS constraints. *Lithosphere*, **5**(1), 128-150.
- Keevil N.B. (1939) The calculation of geologic age. *Amer. J. Sci.*, **237**, 195-214.
- Kennedy A.K., Wotzlaw J.F., Crowley J., Schmitz M., Schaltegger U. (2014) Eocene reference material for microanalysis of U-Th-Pb isotopes and trace elements. *Can. Mineral.*, **52**, 409-421.
- Kosler J., Sylvester P.J. (2003) Present trends and the future of zircon in geochronology: laser ablation ICP/MS. *Zircon. Rev. Miner.*, **53**, 244-275.
- Kozlov V.I., Krasnobaev A.A., Larionov N.N., Maslov A.V., Sergeeva N.D., Bibikova E.V., Genina L.A., Ronkin Yu.L. (1989) *Nizhnii rifei Yuzhnogo Urala* [Lower Riphean of the Southern Urals]. Moscow, Nauka Publ., 208 p. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Bibikova E.V., Stepanov A.I., Kirnozova T.I., Ronkin Yu.L., Makarov V.A., Lepikhina O.P., Kravtsov A.V. (1985) Age of effusive mashak retinue and the problem of the isotope-geochronological boundary of the lower-middle Rifean. *Isotopnoe datirovanie protsessov vulkanizma i sedimentatsii* [Isotopic dating of processes of volcanism and sedimentation]. Moscow, Nauka Publ., 162-175. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N. et al. (2008) Mashaksky volcanism: Situation 2008. *Strukturno-veshchestvennye komplekсы i problemy geodinamiki dokembrii fanerozoiskikh orogenov. Materialy III Chtenii pamyati S.N. Ivanova* [Structural-material complexes and geodynamic problems of the Precambrian Phanerozoic orogens. Materials III Readings memory S.N. Ivanov]. Ekaterinburg, IGG UB of RAS, 61-63. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Busharina S.V.

- (2013) Zircon geochronology of Mashak volcanic rocks and the age of the border of the lower-middle Riphean (South Ural). *Stratigr. Geol. Korrel.*, **21**(5), 3-20. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Larionov. A.N., Nekhorosheva A.G., Berezhnaya N.G. (2007) Polygenous polychronic zirconology and the age problem of the Barangulov gabbro-granite complex. *Dokl. Akad. Nauk*, **416**(2), 241-246. (In Russian)
- Krogh T.E. (1982) Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 637-649.
- Krogh T.E., Davis G.L. (1975) Alteration in zircons and differential dissolution of altered and metamict zircon. *Year Book 74*. Carnegie Institution. Washington, 619-623.
- Lee J.K.W., Williams I.S., Ellis D.J. (1997) Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, **390**, 159-162.
- Mattinson J.M. (2005) Zircon U-Pb chemical abrasion ("CA-TIMS") method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. *Chem. Geol.*, **220**, 47-66.
- Makeev A.F., Levsky L.K. (2006) Opportunities and limitations of ion microprobes for measuring lead and uranium. *Izotopnoe datirovanie protsessov rudoobrazovaniya, magmatizma, osadkootlozheniya i metamorfizma. Materialy III Vserossiiskoi konferentsii po izotopnoi geokhologii*. [Isotopic dating of the processes of ore formation magmatism, sedimentation and metamorphism. Materials of the III Russian conference on isotope geochronology]. V. 2. Moscow, GEOS Publ., 12-15. (In Russian)
- Malich K.N., Efimov A.A., Ronkin Yu.L. (2009) The Archean U-Pb-isotope age of the Nizhny Tagil massif (Ural Platinum-bearing Belt). *Dokl. Akad. Nauk*, **427**(1), 101-105. (In Russian)
- Maslov A.V. (1994) *Osadochnye komplekсы в разрезе riftогенных структур* [Sedimentary complexes in sections of rift structures]. Ekaterinburg, IGG UB of RAS, 176 p. (In Russian)
- Maslov A.V., Ronkin Yu.L. (2008) On some new data on the age of magmatic formations in a typical Riphean section. *Geologiya, poleznye iskopaemye i problem geologii Bashkortostana, Urala i privileyushchikh territorii. Materialy VII Mezhhregional'noi geologicheskoi konferentsii* [Geology, minerals and problems of geocology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories. Materials VII interregional geological conference]. Ufa, DesignPoligraphService Publ., 120-122. (In Russian)
- Meyer C., Williams I.S., Compston W. (1996) Uranium-lead ages for lunar zircons: Evidence for a prolonged period of granophyre formation from 4.32 to 3.88 Ga. *Meteor. Planet. Sci.*, **31**, 370-387.
- Moser D.E., Davis W.J., Reddy S.M., Flemming R.L., Hart R.J. (2009) Zircon U-Pb strain chronometry reveals deep impact-triggered flow. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **277**(1-2), 73-79.
- Mundil R., Metcalfe I., Ludwig K.R., Ronne P.R., Oberli F., Nicoll R.S. (2001) Timing of the Permian-Triassic biotic crisis: implications from new zircon U/Pb age data (and their limitations). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **187**, 131-145.
- Osadochnye basseiny: Metody izucheniya, struktura i evolutsiya* [Sedimentary basins: methods of study, structure and evolution. (Ed. Yu.G. Leonov, Yu.A. Volozh). (2004) Moscow, Nauchnyi Mir Publ., 526 p. (In Russian)
- Ovchinnikova G.V., Kuznetsova A.B., Vasil'eva I.M. Gorokhov I.M. Krupenin M.T., Gorokhovskii B.M., Maslov A.V. (2013) Pb-Pb-age and Sr-isotopic characteristics of mid-Riphean phosphorite nodules: the Zigazino-Komarovskaya Formation of the Southern Urals. *Dokl. Akad. Nauk*, **451**(4), 430-434. (In Russian)
- Paces J.B., Miller J.D. (1993) Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota – geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga midcontinent rift system. *J. Geophys. Res.*, **98**(B8), 13997-14013.
- Parnachev V.P. (1988) Magmatism and Sedimentation in the Late Pre-Cambrian History of the Southern Urals. dis. Dr. geol. and min. sci. diss. Sverdlovsk, IGG, Ural Branch of Akad Nauk USSR, 33 p. (In Russian)
- Parnachev V.P., Rotar' A.F., Rotar' Z.M. (1986) *Srednerifeiskie vulkanogenno-osadochnye assotsiatsii Bashkirskogo megantiklinoriya (Yuzhnyi Ural)* [Middle Riphean volcanogenic-sedimentary association of the Bashkir meganticlinorium (South Ural)]. Sverdlovsk, USC, Acad. Nauk SSSR, 104 p. (In Russian)
- Puchkov V.N., Bogdanova S.V., Ernst R.E., Kozlov V.I., Krasnobaev A.A., Söderlund U., Wingate M.T.D. (2013) The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals. *Lithos*, **174**, 109-124.
- Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Matukov D.I., Nekhorosheva A.G., Lepikhina E.N., Sergeev S.A. (2007) Preliminary data on the age of neo- and mesoproterozoic of the Southern Urals in the light of new U-Pb datings. *Geol. sbornik № 6 IG UNTS RAN*, Ufa, DesignPoligraphService Publ., 3. (In Russian)
- Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Schmitz M., Kozlov V.I., Davydov V.I., Lepekhina E.N., Nekhorosheva A.G. (2009) New U-Pb dating of the Mashak suite volcanic rocks of the Riphean of the Southern Urals and their comparative assessment. *Geol. sbornik № 8 IG UNTS RAN*, Ufa, DesignPoligraphService Publ., 3-14. (In Russian)
- Ronkin Yu.L., Efimov A.A., Lepikhina O.P. (2009) Artifacts from U-Pb SIMS zircon dating. Arbitration comparison with precision U-Pb ID-TIMS and data from other isotopic systems. *Ezhegodnik-2008*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 337-343. (In Russian)
- Ronkin Yu.L., Ivanov K.S., Shmelev V.R., Lepikhina O.P. (2003) Sm-Nd isotopic dating of gabbro-norite of the Kumba massif: *Platinonosnyi poiyas Urala. Izotopnaya geokhologiya v reshenii problem geodinamiki i rudogeneza. Materialy II Vserossiiskoi konferentsii po geokhologii* [The platinum-bearing belt of the Urals. Isotope geochronology in solving problems of geodynamics and ore genesis. Mat-ly II Russian Conf. on geochronology]. St.Peterburg, IGGD RAS, 424-427. (In Russian)
- Ronkin Yu.L., Maslov A.V., Kazak A.P., Matukov D.I., Lepikhina O.P. (2007) The boundary of the lower and middle Riphean in the Southern Urals: new U-Pb isotope SHRIMP-II restrictions. *Dokl. Akad. Nauk*, **415**(3), 370-378. (In Russian)
- Ronkin Yu.L., Maslov A.V., Matukov D.I., Lepikhina O.P., Popov O.Yu. (2005) "Mashak rift event" of the Riphean typical region (Southern Urals): new isotopic-geochronological framework. *Struktura, geodinamika i mineragenicheskie protsessy v litosfere. Tr. XI Mezhdunar. konf.* [Structure, geodynamics and mineragenic processes in the lithosphere. Proceedings of the XI International Conference]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 305-307. (In Russian)
- Ronkin Yu.L., Sindder S., Maslov A.V., Matukov D.I., Kramm U., Lepikhina O.P. (2007) The oldest (3.5 billion years) zircons of the Urals: U-Pb (SHRIMP-II) and TDM restrictions.

- Dokl. Akad. Nauk*, **415**(5), 651-657. (In Russian)
- Ronkin Yu.L., Tikhomirova M., Maslov A.V. (2016) ~1380 Ma The Southern Urals LIP: Precision U-Pb ID-TIMS Restrictions. *Dokl. Akad. Nauk*, **468**(6), 674-679. (In Russian)
- Rykus M.V., Snachev V.I., Nasibullin R.A., Rykus N.G., Savel'ev D.E. (2002) *Osadkonakoplenie, magmatizm i rudonosnost' severnoi chasti zony Uraltau* [Sedimentation, magmatism and ore content of the northern part of the Uraltau zone]. Ufa, BSU Publ., 268 p. (In Russian)
- Schaltegger U.A., Schmitt K., Horstwood M.S.A. (2015) U-Th-Pb zircon geochronology by ID-TIMS, SIMS, and laser ablation ICP/MS: Recipes, interpretations, and opportunities. *Chem. Geol.*, **402**, 89-110.
- Schmitz M.D., Kuiper K.F. (2013) High-precision geochronology. *Elements*, **9**(1), 25-30.
- Schoene B. (2014) 4.10 U-Th-Pb Geochronology. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Oxford, Elsevier, 341-378.
- Schoene B., Crowley J., Condon D., Schmitz M., Bowring S. (2006) Reassessing the uranium decay constants for geochronology using ID-TIMS U-Pb data. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 426-445.
- Semikhatov M.A. (2000) Refinement of estimates of the isotopic age of the lower boundaries of Upper Riphean, Vendian, Upper Vendian, and Cambrian. *Dopolneniya k stratigraficheskomu kodeksu Rossii* [Additions to the stratigraphic code of Russia]. St.Peterburg, VSEGEI, 95-107. (In Russian)
- Semikhatov M.A., Shurkin K.A., Aksenov E.M., Bekker Yu.R., Bibikova E.V., Duk V.L., Esipchuk K.E., Karsakov L.P., Kiselev V.V., Kozlov V.I., Lobach-Zhuchenko S.B., Negrutsa V.Z., Robonen V.I., Sezko A.I., Filatova L.I., Khomentovsky V.V., Shemyakin V.M., Schuldiner V.I. (1991) New Precambrian stratigraphic scale of the USSR. *Izv. AN SSSR. Ser. geol.*, **8**, 3-14. (In Russian)
- Sircombe K.N. (1997) Detrital mineral SHRIMP geochronology and provenance analysis of sediments in Eastern Australia. PhD dissertation. Australian National University. Canberra, 312 p.
- Sircombe K.N. (1999) Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia. *Sediment. Geol.*, **124**, 47-67.
- Schoene B., Crowley J., Condon D., Schmitz M., Bowring S. (2006) Reassessing the uranium decay constants for geochronology using ID-TIMS U-Pb data. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 426-445.
- Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse, M.J. (2008) Plešovice zircon – a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1-35.
- Stratigraficheskie skhemy Urala (dokemrii, paleozoi)* [Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Paleozoic)]. (1993) Ekaterinburg, Roskomnedra, IGG UB RAS, 151 p. (In Russian)
- Tilton G.R., Patterson C.C., Brown H., Inghram M., Hayden R., Hess D., Larsen Jr. E. (1955) Isotopic composition and distribution of lead, uranium, and thorium in a Precambrian granite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **66**, 1131-1148.
- Vasil'eva I.M., Ovchinnikova G.V., Kuznetsov A.B., Gorokhov I.M., Krupenin M.T., Maslov A.V., Gorokhovskiy B.M. (2009) Pb-Pb age of Middle Riphean phosphorite nodules (Zigazino-Komarov Formation of the Southern Urals). *Izotopnye sistemy i vremya geologicheskikh protsessov. Materialy IV Vseros. Konf. po izotopnoi geokhologii. T. I* [Isotopic systems and time geological processes. Materials IV Ross. conf. on isotopic geochronology. Vol. I]. St.Peterburg, IP Katalkina Publ., 99-101. (In Russian)
- Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. (1995) Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. Newslett.*, **19**, 1-23.
- Wilde S.A., Valley J.W., Peck W.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.
- Williams I.S. (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Eds M.A. McKibben, W.C. Shanks III, W.I. Ridley. *Rev. Econ. Geol.*, **7**, 1-35.