

## АРТЕФАКТЫ ПРИ U-Pb SIMS ДАТИРОВАНИИ ЦИРКОНОВ (АРБИТРАЖНОЕ СРАВНЕНИЕ С ПРЕЦИЗИОННЫМИ U-Pb ID-TIMS И ДАННЫМИ ИНЫХ ИЗОТОПНЫХ СИСТЕМ)

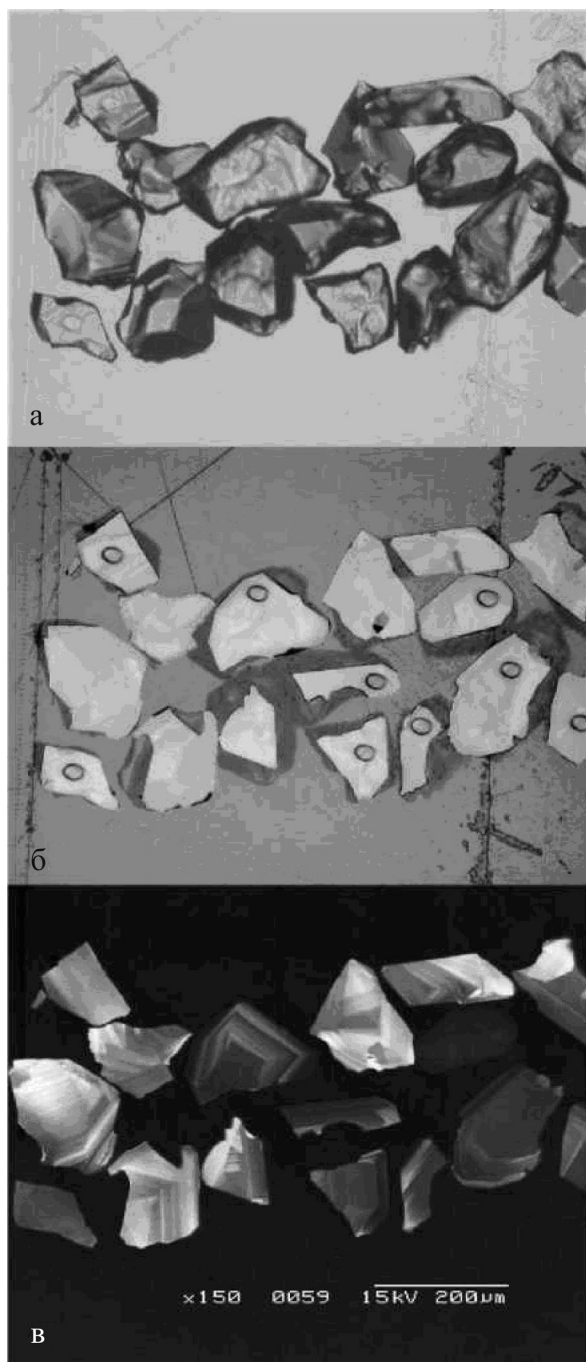
Ю. Л. Ронкин, А. А. Ефимов, О. П. Лепихина

U-Pb метод датирования является первым геохронометром, реализованным для урановых минералов [8]. По мере совершенствования аналитических возможностей методов изотопной геологии, появилась возможность изучения U-Pb систем минералов с более низкими содержаниями урана и тория, и в частности, циркона [17], являющегося сегодня абсолютным рекордсменом по количеству выполненных по нему определений U-Pb возраста. Адресуя читателя к статье [14], в которой излагаются исчерпывающие сведения об истории развития метода, следует отметить, что в настоящее время U-Pb датирование цирконов осуществляется преимущественно двумя способами. Первым является классический метод изотопного разбавления (ID – Isotope Dilution), предполагающий использование трассера (spike-имеющего искусственно обогащенный относительно природного изотопный состав U-Pb) и последующего масс-спектрометрического анализа U-Pb изотопного состава смесей исследуемого материала с трассером при помощи прецизионных твердофазных анализаторов с твердофазной ионизацией (TIMS – Thermal Ionization Mass Spectrometry) и/или мультколлекторными MC-ICP/MS. Другими способами U-Pb датирования цирконов являются локальные, “in situ” методы, позволяющие анализировать U-Pb изотопный состав наногаммовых, и менее, объемов вещества. Инструменты, реализующие подобный подход основаны на масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS – Secondary Ion Mass Spectrometry [16]) и лазерной абляции LA-ICP/MS [18]. Поскольку основы рассматриваемых U-Pb методов датирования фундаментально отличаются, каждому из них присущи свои преимущества и недостатки.

U-Pb ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS методы позволяют получить беспрецедентную, на сегодня, точность датирования (к примеру,  $2727.0 \pm 0.6$  млн. лет [13]) как единичных кристаллов циркона, так и их фрагментов. Важным преимуществом ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS перед SIMS методами является то, что концентрации, изотопный состав свинца и урана в исследуемом веществе определяются с высокой точностью, непосредственно по соответствующим ионным токам изотопов этих элементов, исключая процедуру калибровки по стандарту с известным возрастом. Однако претворение этих методик весьма трудоемка и дорогостояща, предпо-

лагая реализацию “чистой химии” (наличие специального стерильно-производственного помещения, чистых реагентов и перегонных аппаратов для их приготовления, тонкой хроматографии, калиброванных растворов, трассеров, изотопных стандартов, точных весов и т. п.), а также приобретение прецизионного TIMS или MC-ICP/MS анализатора. Кроме того, поддержание соответствующего уровня персонала и рабочего ритма такой лаборатории представляет собой также весьма непростую задачу. Известные методологические трудности вызывает U-Pb ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS датирование полифазных цирконов, требующих реализации физической и химической сепарации (аэробразии [19], селективного разложения [20]).

Что касается U-Pb SIMS датирования цирконов, то в настоящее время доминирующими инструментами в этой области являются SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe) представляющий собой прецизионный вторично-ионный микрозонд высокого разрешения, производитель ASI (Австралия), Cameca IMS (1270, 1280) производства одноименной французской фирмы и VG Isolab 120 (UK). Принцип работы SHRIMP основан на том, что пучок ионов  $^{16}\text{O}_2^-$  кислорода, ускоряемых напряжением до 10 кВ, фокусируется оптикой Колера в параллельный пучок поперечным сечением 5–30 мкм и направляется на поверхность анализируемого образца. Ионная бомбардировка, формируя на мишенном кратере, 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 фокусировкой по массам и энергиям, попадая в приемную щель регистрирующего канала. Высокое разрешение SHRIMP (более 5000) позволяет производить практически полное разделение изотопов свинца и урана от мешающих изобарных наложений ( $\text{Zr}_2\text{O}$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{HfSi}$ ), характерных для спектра вторичных ионов, эмитированных цирконовой мишенью. В результате ионной бомбардировки первичным пучком мишенью производится уран как в виде металлических, так и окисных и двуокисных ионов в соотношении приблизительно:  $\text{UO}_2^+/\text{UO}^+/\text{U}^+ \sim 3:7:1$ , в то время как свинец представлен почти нацело металлической



**Рис. 1.** Результаты изучения кристаллов цирконов Темога [6] с помощью оптического и электронного микроскопов.

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

формой –  $Pb^+$ . В силу этого, получаемые в результате прямых измерений ионные отношения  $Pb^+/U^+$  являются в сильнейшей степени искаженными по сравнению с истинными атомными U/Pb отношениями в исследуемом цирконе, что предполагает реализацию измерений по принципу “стандарт-

образец”. В качестве стандартного образца используется циркон (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.

Принцип работы SIMS Cameca 1270 и VG Isolab 120 в целом аналогичен. Не вдаваясь в конструктивные отличия этого прибора и SHRIMP, можно отметить, что чувствительность инструментов относительно Pb весьма схожа, приблизительно 25 импульсов в секунду на ppm вещества, при 1 нА токе первичного пучка. Первичные потоки луча для обоих инструментов обычно ограничиваются 10 нА, для минимизации дискриминирующих эффектов и получения типичной максимальной чувствительности при анализе цирконов приблизительно 200 импульсов/ppm.

Несомненным преимуществом SIMS инструментов является возможность U-Pb датирования объемов до  $100 \text{ мкм}^3$  в пределах одного кристалла, что позволяет документировать сложную эволюцию цирконов во времени. Основным недостатком метода является значительная, на порядок и более, погрешность анализа в сравнении с ID-TIMS или ID-MS-ICP/MS [12] (наиболее существенно проявляющаяся для “молодых”, палеозойских, и моложе, поскольку в этом случае основное ограничение на точность определяется неопределенностью в калибровке Pb/U отношения образований, характеризующихся относительно меньшим содержанием радиогенного свинца), что “маскирует” возможные потери свинца (и/или привнос урана). Сложившаяся ситуация нередко обуславливает появление артефактов при интерпретации U-Pb цирконовых данных, что в свою очередь приводит к выделению “этапов” магматизма, метаморфизма, ложным представлениям о длительной “эволюции” изучаемых геологических объектов и т.д. Настоящая работа направлена на некоторое прояснение этих моментов.

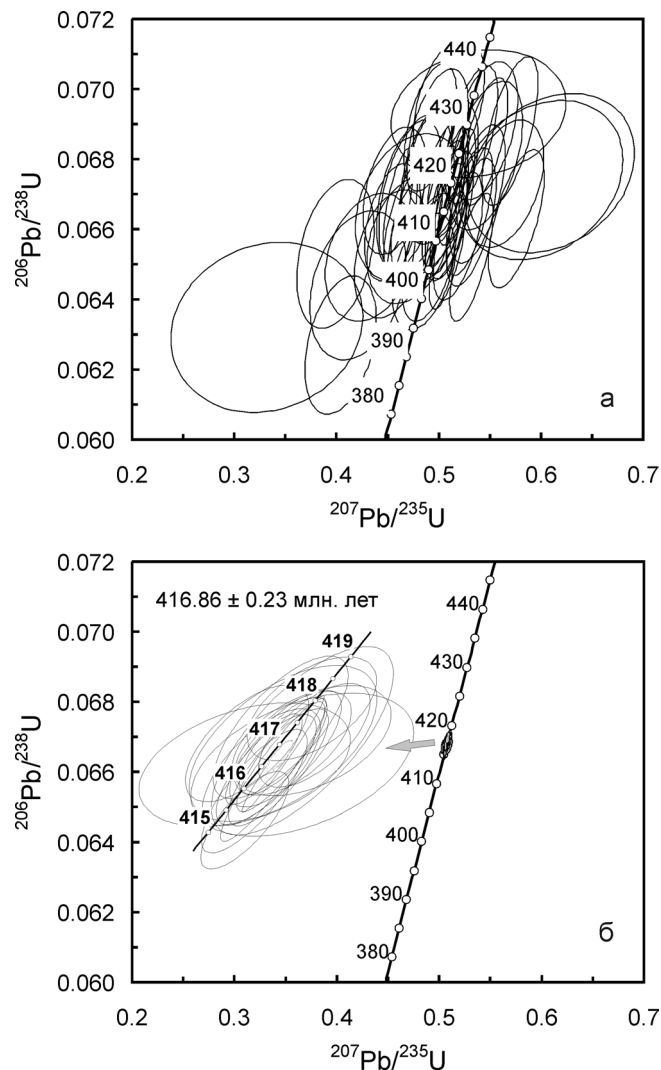
Для достижения поставленной цели нами приводятся как собственные, так и компилятивные данные по сравнению U-Pb SIMS и Sm-Nd ID-TIMS фактуры по одним и тем же (в том числе, по Уральским), образованиям. Первым объектом для сопоставления результатов U-Pb SIMS и U-Pb ID-TIMS датирования может служить аттестованный стандарт Темога, представляющего собой цирконы, выделенные из Middledale Gabbroic Diorite (Австралия). К настоящему времени, этот стандарт всесторонне изучен, кроме того, он многократно U-Pb ID-TIMS датирован, а количество U-Pb SIMS анализов измеряется тысячами [6, 7, 15]. Соответствующие исследования показали, что цирконы Темога являются в высокой степени конкордантными в

отношении U-Pb ID-TIMS **возрастных данных и гомогенными** по U/Pb отношению, т.е. являются собой пример “закрытой” изотопной U-Pb системы. Тем не менее, гомогенность по U/Pb отношению в этих цирконах не сопровождается таковой по концентрациям урана. Более того, уран распределен относительно неравномерно, что отражается в наличии четко проявленной секториальной зональности на катодолюминесцентных изображениях (рис. 1).

На рис. 2а в координатах  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  приведены результаты U-Pb SHRIMP датирования цирконов стандарта Темога в сессии Z3673 выполненной в Австралии [15]. Рассматриваемый рисунок 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, так и ниже конкордии, демонстрируя, в соответствии с имеющимися представлениями, потерю свинца и/или привнос урана. Если не иметь независимых аргументов, формально можно утверждать о “сложной истории” изученных цирконов. Аналогичные выводы можно сделать и по гистограммам, демонстрирующих разброс возрастных значений вычисленных по отношениям  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  (рис. 3а, б, в, соответственно). Анализ представленной информации позволяет сделать заключение, что только по отношениям  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  (рис. 3а), возможно оценить среднее значение возраста  $416.2 \pm 2.5$  (0.61%), 95% 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) цирконов стандарта Темога [6] рис. 2в. Сравнение U-Pb ID-TIMS данных (рис. 2в) с U-Pb SHRIMP результатами (рис. 2а), нанесенных на график с конкордией в одинаковых масштабах, позволяет четко оценить, насколько значительна разница в погрешностях обоих методов. Значимое отличие наблюдается и в величинах дискордантности. Из 25 значений, только для 5 кратеров коэффициенты дискордантности имеют значения – 1.46, 1.19, 1.23, 1.25, 1.68. Для остальных 20 кратеров, все величины менее единицы, подтверждая возрастную гомогенность (в отличие от U-Pb SHRIMP результатов) реферируемого материала. Таким образом, U-Pb ID-TIMS **данные демонстрируют возраст**  $416.86$  млн. лет с погрешностью всего лишь  $\pm 0.23$  млн. лет.

Другим показательным примером является сравнительное изучение U-Pb SIMS (Cameca IMS) и U-Pb ID-TIMS систематики цирконов габбро-



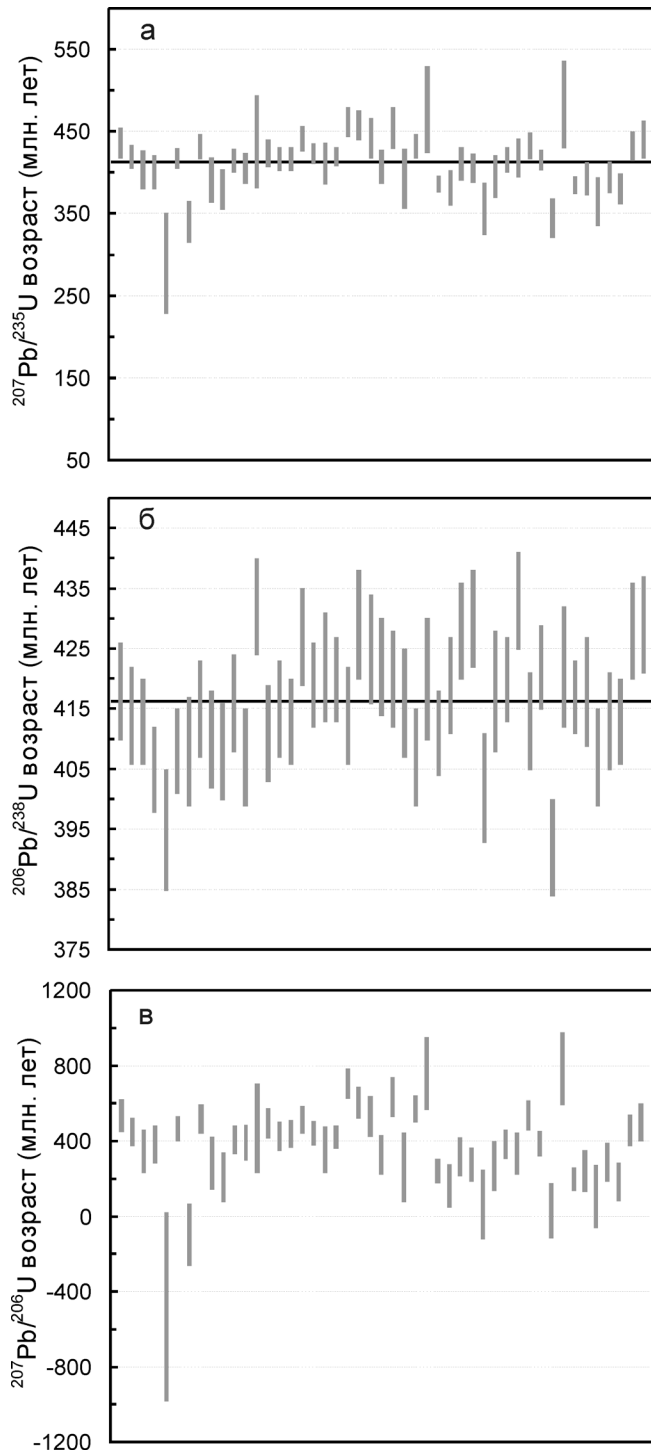
**Рис. 2.** U-Pb данные для цирконов стандарта Темога.

Общее количество кратеров 45 шт.; а – U-Pb SHRIMP, шайба Z3673 [15], аналитические погрешности по осям координат  $\pm 1\sigma$ ; б – U-Pb ID-TIMS [6], аналитические погрешности по осям координат  $\pm 2\sigma$ , слева вверху вставка в увеличенном масштабе, возраст  $416.86 \pm 0.23$  млн. лет. Для сравнения а и б основной масштаб представления одинаков. Расчеты по [21].

норита Кумбинского массива [9], Платиноносный пояс Урала. Выделенные из габбро-норита цирконы (рис. 4) представлены бесцветными прозрачными размером более 100 мкм индивидами, часто имеющие искаженную форму (4а), включения, как остроугольные, так и таблитчатые окончания (4б), невыраженную внутреннюю структуру и содержания U от 200 до 2000 ppm.

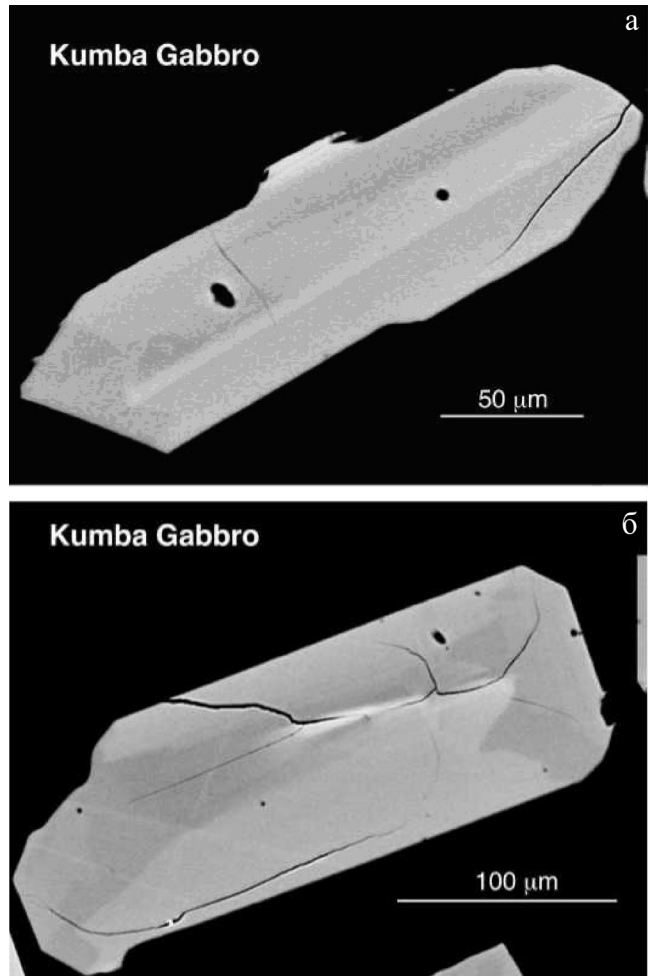
На рис. 5а приведены результаты U-Pb SIMS (Cameca IMS) датирования цирконов габбро-норита Кумбинского массива, Платиноносный пояс Урала. На графике с конкордией фигуративные эллипсы (как и в предыдущем случае) демонстрируют типичный для U-Pb SIMS датирования случай,





**Рис. 3.** Pb-U SHRIMP возрасты для цирконов стандарта Темога, шайба Z3673 [15].

Общее количество кратеров 45 шт. Аналитические погрешности по осям координат  $\pm 1\sigma$ . Возрасты: а – по отношению  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ , СКВО = 2.0, вероятность соответствия = 0; б – по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , среднее значение возраста (горизонтальная утолщенная линия)  $416.2 \pm 2.5$  (0.61%), 95% дов. уровень, СКВО = 1.20, вероятность соответствия = 0.17; в – по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ , СКВО = 2.6, вероятность соответствия = 0.



**Рис. 4.** Результаты изучения кристаллов цирконов из габбро-норита Кумбинского массива, Платиновый пояс Урала [9] с помощью электронного микроскопа, катодолуминесценция BSE.

когда U-Pb данные, характеризующаяся значимой дискордантностью (от  $-2.58$  до  $+12.69$ ), локализируются вдоль конкордии с некоторым размахом (возрасты по отношениям  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  варьируют от 387–433 и 397–431 млн. лет), что интерпретируется иногда геологами как реальные геологические события. Следуя подобной логике, можно говорить о том, что исследованные цирконы имели достаточно длительную 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:  $400.9 \pm 5.8$  млн. лет (СКВО = 1.3) и  $416.6 \pm 5.3$  млн. лет (СКВО = 1.18) с вероятностями соответствия 0.25 и 0.28 соответственно (рис. 4а, нижняя и верхняя вставки соответственно).

Однако прецизионное U-Pb ID-TIMS датирование, выполненное по тем же цирконам, приводит к совершенно иным представлениям (рис. 5б). На

графике с конкордией шесть фигуративных точек цирконов образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией определяет возраст  $425 \pm 3$  млн. лет с высокой вероятностью соответствия конкордантности 0.84. И вновь сравнение U-Pb SIMS и ID-TIMS фактуры по одним и тем же цирконам позволяет выявить, насколько результаты U-Pb SIMS неоднозначны относительно U-Pb ID-TIMS данных. Очевидно, что площадь конкретного эллипса полученного с помощью U-Pb SIMS метода может служить геометрическим местом для локализации множества фигуративных точек (рис. 6) определенных с помощью U-Pb ID-TIMS [10, 12]. Иными словами, при U-Pb SIMS датировании складывается ситуация, когда положение фигуративной точки на графике с конкордией не может быть однозначно определено как конкордантное или дискордантное (рис. 6). Отсюда большая вероятность появления артефактов при интерпретации реальных геологических процессов датированных с помощью U-Pb SIMS. Сюда же следует отнести и U-Pb датирование с помощью LA ICP-MS, где погрешности еще больше [10, 18].

К настоящему времени список публикаций по сравнительному U-Pb SIMS и ID-TIMS датированию цирконов, а также комплексирования U-Pb SIMS измерений с результатами изучения поведения  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , Rb-Sr, Sm-Nd, Re-Os и иных изотопных систем, достаточно представительен, некоторые ссылки можно найти в нижеприведенном списке литературы. Для уральских объектов этот перечень можно продолжить ссылками на работы, в которых была изучена U-Pb систематика цирконов из нефелиновых сиенитов Бердяшского массива [4, 5] и плагиогранитов [1, 4].

Таким образом, опираясь на компилятивный и собственный материал, резюмируя изложенное выше, можно сделать следующие выводы:

1. U-Pb ID-TIMS или ID-МС-ICP/MS методы позволяют получить беспрецедентную, на сегодня, точность датирования как единичных кристаллов циркона, так и их фрагментов. Однако претворение этих методов весьма трудоемко и дорогостояще, предполагая наличие целого комплекса специального оборудования, чистых помещений, стандартов и реагентов. Известные методологические трудности вызывает U-Pb ID-TIMS или ID-МС-ICP/MS датирование полифазных цирконов, требующих реализации физической и химической сепарации.

2. Преимуществом SIMS инструментов является возможность U-Pb датирования нано-объемов в пределах одного кристалла, что позволяет документировать сложную эволюцию цирконов во времени. Основным недостатком метода – значительная, на порядок и более, погрешность анализа (в сравнении с ID-TIMS или ID-МС-ICP/MS, наиболее существенно проявляющаяся для “молодых”, палеозойских образований, характеризующихся относитель-

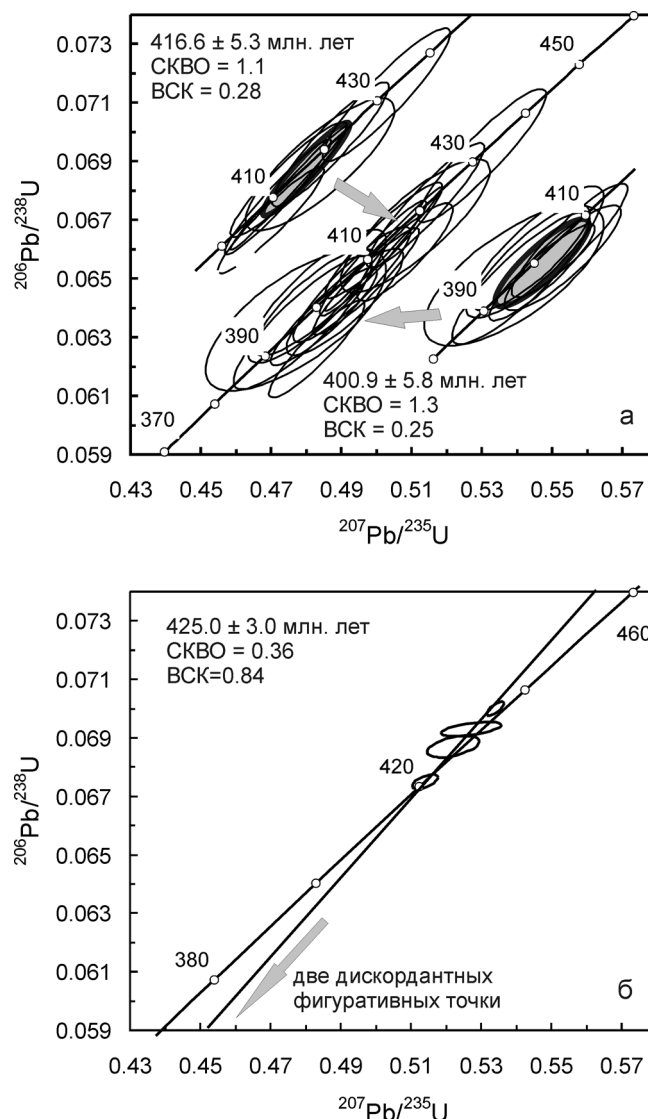


Рис. 5. U-Pb данные для цирконов из габбро-норита Кумбинского массива, Платиноносный Пояс Урала [9].

а – SIMS (Cameca IMS), аналитические погрешности по осям координат  $\pm 1\sigma$ , фигуративные эллипсы 16 кратеров локализуются вдоль конкордии с некоторым размахом ( $409.2 \pm 4.5$  млн. лет, СКВО = 1.2, возрасты по отношениям  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  варьируют от 387–433 и 397–431 млн. лет), характеризуются вариациями величин дискордантности от  $-2.58$  до  $+12.69$ . Вставки внизу и вверху, в том же масштабе, отображают два возрастных кластера, определяющих возрасты  $400.9 \pm 5.8$  млн. лет (СКВО = 1.3) и  $416.6 \pm 5.3$  млн. лет (СКВО = 1.18) с вероятностями соответствия конкордантности (BCK) 0.25 и 0.28 соответственно;

б – ID-TIMS, аналитические погрешности по осям координат  $\pm 2\sigma$ . Фигуративные эллипсы 6 кристаллов аппроксимируются дискордией (СКВО = 0.36), верхнее пересечение которой с конкордией определяет возраст  $425 \pm 3$  млн. лет, BSK = 0.84.

Для наглядного сравнения а и б, основной масштаб представления U-Pb данных одинаков.

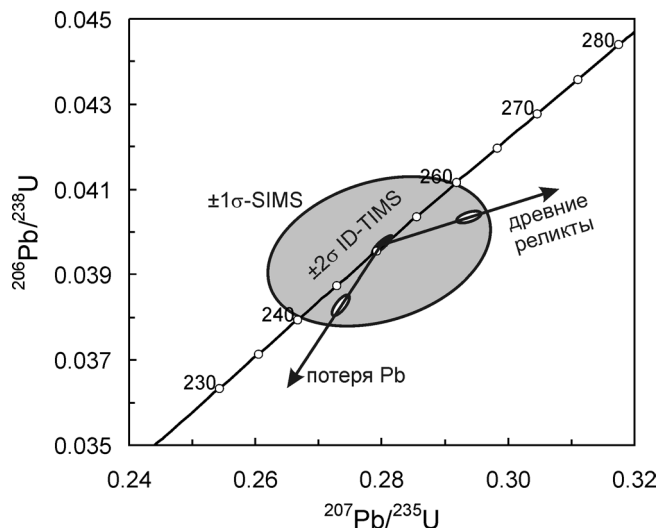


Рис. 6. Сравнение погрешностей U-Pb SIMS и U-Pb ID-TIMS датирования пермских цирконов [10–11].

но меньшим содержанием радиогенного свинца), маскирующая возможные потери свинца (и/или привнос урана), что в конечном итоге часто определяет возникновение артефактов при интерпретации U-Pb цирконовых данных (приводя к выделению “этапов” магматизма, метаморфизма, ложным представлениям о длительной “эволюции” изучаемых геологических объектов и т.д.).

3. Для исключения возможных артефактов при U-Pb SIMS датировании цирконов, необходимо выполнение независимых U-Pb ID-TIMS исследований, либо изучение закономерностей поведения иных изотопных систем (Rb-Sr, Sm-Nd и т.д.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов А.А., Ронкин Ю.Л., Зиндерн С. и др. U-Pb данные по цирконам плагиогранитов Кытлымского массива: изотопный возраст поздних событий в истории Платиноносного пояса Урала // Докл. АН. 2005. Т. 403. № 4. С. 512–516.
2. Макеев А.Ф., Левский Л.К. Возможности и ограничения ионных микрозондов при измерении свинца и урана // Мат-лы III Российской конференции по изотопной геохронологии. 2006. Т. 2. С. 12–15.
3. Ронкин Ю. Л., Ефимов А.А., Матуков Д. И. и др. Платиноносный пояс Урала: “In situ” U-Pb SHRIMP и ID-TIMS датирование цирконов плагиогранитов Кытлымского массива // Уральское металлогеническое совещание. Миасс: ИМин УрО РАН, 2005. С. 138–140.
4. Ронкин Ю.Л., Матуков Д.И., Пресняков С.Л. и др. “In situ” U-Pb SHRIMP датирование цирконов нефелиновых сиенитов Бердяшского массива (южный Урал) // Литосфера. 2005. № 1. С. 135–142.
5. Синдерн С., Ронкин Ю.Л., Крамм У. и др. U-Pb датирование единичных кристаллов циркона с применением трассера  $^{205}\text{Pb}/^{233}\text{U}$ : на примере нефелино-

- вых сиенитов Бердяшского массива, южный Урал // Мат-лы II Российской конф. по геохронологии. Санкт-Петербург. 2003. С. 461–465.
6. Black L.P., Kamo S.L., Allen S.M. et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology // Chemical Geology. 2003. V. 200 (1-2). P. 155–170.
  7. Black, L. P., Kamo S. L., Williams I. S. et al. The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology; a critical appraisal of four zircon standards // Chemical Geology. 2003. V. 200 (1-2). P. 171–188.
  8. Boltwood B.B. On the ultimate disintegration products of the radioactive elements. Part II. The disintegration products of uranium // Am. J. Sci. 1907. V. 23. P. 77–88.
  9. Bosch D., Bruguier O., Efimov A. et al. A Middle Silurian age for the Uralian Platinum-bearing Belt (Central Urals, Russia) // U-Pb zircon evidence and geodynamic implication. Geological Society, London, Memoirs. 2006. V. 32. P. 443–448.
  10. Bowring S. A. and M. D. Schmitz. High-Precision U-Pb Zircon Geochronology and the Stratigraphic Record // J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin, Editors, Zircon. Reviews in Mineralogy, 2003. V. 53. P. 305–326.
  11. Claoue-Long J.C., Zhang Z.C, Ma G.G. et al. The age of the Permian-Triassic boundary // Earth Planet Sci. Lett. 1991. V. 105. P. 182–190.
  12. Compston W. Geological age by instrumental analysis // The 29th Hallimond Lecture. Mineral Mag. 1999. V. 63. P. 297–311.
  13. Davis D.W., Poulsen K.H., Kamo S. L. New insights into Archean crustal development from geochronology in the Rainy Lake area, Superior Province, Canada // J. Geol. 1989. V.97. P. 379–398.
  14. Davis D.W., Williams I.S., T.E. Krogh. Historical development of zircon geochronology // J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin, Editors, Zircon. Reviews in Mineralogy, 2003. V. 53. P. 145–181.
  15. Dunphy J.M., Fletcher I.R., Cassidy K.F. et al. Compilation of SHRIMP U-Pb geochronological data, Yilgarn Craton, Western Australia, 2001–2002. 2003. Geoscience Australia, Record 2003/15. 139 p.
  16. Ireland T.R., I.S. Williams. Considerations in Zircon Geochronology by SIMS // J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin, Editors, Zircon. Reviews in Mineralogy. 2003. V. 53. P. 215–241.
  17. Keevil N.B. The calculation of geologic age // Am J Sci. 1939. V. 237. P. 195–214.
  18. Kosler J. and P.J. Sylvester. Present trends and the future of zircon in geochronology: laser ablation ICPMS // J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin, Editors, Zircon. Reviews in Mineralogy, 2003. V. 53. P. 244–275.
  19. Krogh T.E. Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique // Geochim Cosmochim Acta. 1982. V. 46. P. 637–649.
  20. Krogh T.E., Davis G.L. Alteration in zircons and differential dissolution of altered and metamict zircon // Carnegie Institution Washington. 1975, Year Book 74. P. 619–623.
  21. Ludwig K. R. // Isoplot/Ex ver. 2.49. Berkeley Geochronology Center. Special Publication No. 1a. 2001. 55 p.
  22. Ludwig, K.R. SQUID 1.02. A User’s Manual // Berkeley Geochronology Center Special Publication. N 2, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, 2000. USA. 19 p.
  23. Parrish R. R., and S. R. Noble. Zircon U-Th-Pb

- Geochronology by Isotope Dilution Thermal Ionization Mass Spectrometry (ID-TIMS) // J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin, Editors, Zircon. Reviews in Mineralogy. 2003. V. 53. P. 183–213.
24. *Stern, R.A.* The GSC Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP): analytical techniques of zircon U-Th-Pb age determinations and performance evaluation // Radiogenic Age and Isotopic Studies: Report 10; Geological Survey of Canada, Current Research 1997-F, P. 1–31.
25. *Stern, R.A.* A new isotopic and trace-element standard for the ion microprobe: preliminary thermal ionization mass spectrometry (TIMS) U-Pb and electron-microprobe data // Radiogenic Age and Isotopic Studies: 2000. Report 14, Geological Survey of Canada, Current Research 2001-F1. 11 p.