

## **БЕРДЯУШСКИЙ МАССИВ: 1350±10 МЛН ЛЕТ ИЛИ ДРЕВНЕЕ?**

**Ю.Л. Ронкин, А.В. Маслов, Д.И. Матуков, О.П. Лепихина,  
О.Ю. Попова, Г.А. Лепихина**

**Формулировка проблемы.** В соответствии с имеющимися на сегодня представлениями, граница нижнего и среднего рифея в типовой области (Башкирский антиклинорий Южного Урала), датируется возрастом 1350±10 млн лет. Она совпадает со сложно построенным «машакским рифтогенным событием» [Ронкин и др., 2005б], включающим формирование основных и кислых магматитов машакской свиты, субсинхронных им диабазов Главной дайки Бакальского рудного поля, а также гранитов-ра-

пакиви и ассоциирующих пород Бердяушского массива (БМ), прорывающих карбонатные отложения саткинской свиты. Эта цифра была получена в результате реализации комплексных работ 80-х годов прошлого столетия, (в том числе с участием некоторых авторов этой статьи [Краснобаев и др., 1984]) с применением нескольких методов изотопного датирования: К-Аг по минералам, Rb-Sr по породам в целом и U-Pb по акцессорным цирконам. Следует отметить, что объем изотопного опробования ос-

новых разновидностей пород K-Ag и Rb-Sr методами был более или менее состоятелен (и был развит дополнительно впоследствии [Ronkin, Lepikhina, 2001]). Что же касается U-Pb датирования цирконов пород БМ, в литературе фигурируют сведения всего лишь о пяти фигуративных точках (в координатах  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ) «миллиграммовых» фракций цирконов, выделенных из трех гранитов, трех кварцевых сиенит-диоритов (две пробы), и одной из габбро [Краснобаев и др., 1986]. Аппроксимация положения точек дискордий на графике с конкордией для цирконов из каждого вида пород, к примеру для кварцевых сиенит-диоритов определяет большое значение среднего квадрата взвешенных отклонений (MSWD) 474, для гранитов 28. Что касается цирконов из нефелиновых сиенитов, то для них, до недавнего времени, фигурировали сведения всего лишь о двух фигуративных точках с возрастными соотношениями  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  – 1086 и 1302 млн лет [Краснобаев, 1986]. При этом в соответствии с аналитическими возможностями того времени (80-е годы), было выполнено U-Pb датирование миллиграммовых количеств (сотен, тысяч индивидуальных зерен цирконов) «классическим» способом. Успешное применение выполненного способа изотопного датирования во многом определяется степенью «однородности» (цвет, размеры, форма, содержание включений и т.д.) выделяемых «монофракций» цирконов. Очевидно, что результаты датирования такого «общества», даже после трудоемкой селекции зерен с помощью микроскопа, характеризуются определенным «усреднением», которое, в свою очередь, не может быть описано в рамках достаточно унитарных графических моделей, применяемых при интерпретации экспериментально-полученных U-Pb изотопных данных. Уменьшение же объема анализируемого материала сдерживалось аналитическими возможностями используемых в то время масс-спектрометров и отсутствием адекватной «чистой» химии на этапе кислотного разложения, и, как следствие, наличием значительного загрязнения ксеногенным свинцом. С появлением современных высокочувствительных прецизионных масс-анализаторов и дальнейшим развитием методов кислотного разложения исследуемого вещества появилась потенциальная возможность датирования единичных кристаллов цирконов и даже их фрагментов. В результате исследователь имеет уникальную возможность детального

выбора определенного индивида, обладающего набором конкретных особенностей, соответствующих решаемой задаче. Как показала практика U-Pb датирования единичных цирконов, в подавляющем большинстве полученные данные имеют меньшую дискордантность и большую точность в сравнении с анализом значительных по объему концентратов цирконов. Точность датировок возрастает в связи с тем, что фигуративные точки на соответствующих графиках локализируются либо вблизи, либо непосредственно на конкордии, что позволяет минимизировать погрешности, связанные с проецированием значительной дискордантности на конкордию. Первые результаты по U-Pb датированию единичных зерен циркона, выделенных из нефелиновых сиенитов Бердяшского массива с применением смешанного трассера  $^{205}\text{Pb}/^{233}\text{U}$ , были опубликованы в работе [Синдерн и др., 2003] и характеризуются возрастом  $1368,4 \pm 6,2$  млн лет, что значимо древнее ранее опубликованных [Краснобаев, 1986]. Близкая цифра (в пределах полученных погрешностей)  $1373 \pm 21$  млн лет была получена в результате U-Pb датирования 9 кристаллов «in situ» с помощью SHRIMP-II [Ронкин и др., 2005в], что также соответствует более древнему возрасту. Поскольку существует устойчивое мнение о том, что нефелиновые сиениты моложе остальных пород, датирование индивидуальных кристаллов цирконов, выделенных из габбро, кварцевых сиенитов и рапакиви на современном аналитическом уровне представляется весьма актуальным направлением, что и определило это исследование. В настоящей работе публикуются полученные U-Pb данные по цирконам габбро Бердяшского массива, произведенные с помощью SHRIMP-II [Ронкин и др., 2005г].

#### **Анализируемый материал и аналитика.**

В работе были использованы образцы габбро, отобранные авторами в результате полевых работ 1998-2004 гг. Выделение цирконов из пород производилось по традиционной схеме. Тяжелые минералы были извлечены после дробления исходных проб путем разноразмерного просеивания, применения концентрационного стола, изодинамического магнитного сепаратора и тяжелых жидкостей. Окончательная выборка целевых цирконов осуществлялась вручную, под биноклем. Выбранные индивиды, представляющие собой относительно крупные (более 300 микрон) розового цвета кристаллы, совместно со стандартами SL13, 91500 и TEMORA

[Black et al., 2003a,б]. были зафиксированы смолой Eponix в пределах шайбы диаметром 25 мм, которая шлифовалась абразивом до выведения кристаллов на поверхность. Далее, с помощью сканирующего электронного микроскопа (CamScan MX2500 с катодолюминесцентной системой CLI/QUA2, Bentham) были получены катодолюминесцентные изображения CL (рис. 1-2). Полученные CL образы позволяют выбрать подходящие, с точки зрения методологии эксперимента, координаты точки локального микрозондового исследования в пределах изучаемых кристаллов цирконов для исключения смешения изотопных характеристик полихронных участков кристаллической решетки единичного зерна минерала, обусловленного разными

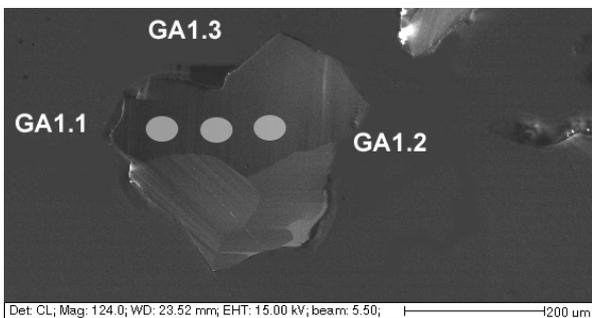


Рис. 1. Катодолюминесцентные изображения единичного кристалла циркона из габбро GA1 Бердяшского массива. Указанные эллипсы демонстрируют локализацию кратеров размером до 30 и глубиной до 3-4 мкм, образующихся на поверхности кристалла под воздействием первичного кислородного пучка SHRIMP.

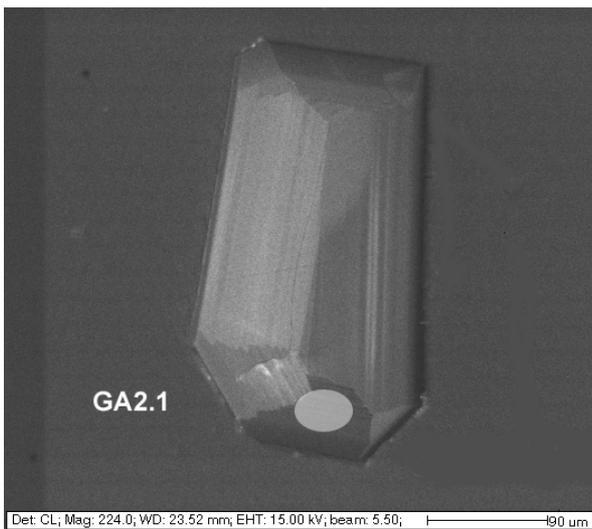


Рис. 2. Катодолюминесцентные изображения единичного кристалла циркона габбро GA2 Бердяшского массива. Указанный эллипс демонстрирует локализацию кратера в результате воздействия первичного пучка SHRIMP.

наборами и концентрациями микропримесных элементов, их валентным состоянием и наличием структурных дефектов. Затем подготовленная описанным выше способом шайба с цирконами загружалась в шлюз SHRIMP II (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe II), представляющий собой прецизионный вторично-ионный микрозонд высокого разрешения производства фирмы ASI (Австралия). Принцип работы SHRIMP II основан на том, что пучок ионов  $^{16}\text{O}_2$  кислорода (или цезия), ускоряемый напряжением до 10kV, фокусируется оптикой Колера в параллельный пучок поперечным сечением 5-30 микрон 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 собираются электростатическими линзами вторичной колонны из области ионизации и после фокусировки вторичного пучка направляются в масс-анализатор с двойной фокусировкой, где разделяются по массам и энергиям, попадая в приемную щель регистрирующего канала. Непосредственный процесс измерения изотопного состава интересующих элементов условно состоял из двух этапов: после завершения всех настроек и калибровок производилось измерение изотопного состава свинца и урана – свинцового отношения в стандартном цирконе, которые в дальнейшем использовались в качестве реперных для вычисления U-Pb возраста образца. Для каждого «выстрела» производилась регистрация 5-7 спектров масс-пиков  $^{90}\text{Zr}_2\text{O}$ ,  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}^{16}\text{O}$ , и  $^{238}\text{U}^{16}\text{O}$ . На втором этапе пучок первичных ионов направлялся на поверхность изучаемого образца циркона в выбранную, на основании предварительного изучения катодолюминесцентных изображений, зону кристалла. Производилось измерение изотопного состава свинец и уран – свинцового отношения в интересующей точке в течение 10-15 минут для достижения необходимой статистической погрешности. Цирконовые стандарты TEMORA, 91500 и SL13 анализировались через каждые 4-5 анализов испытываемых образцов. На последнем этапе производилась обработка полученной аналитической информации с использованием программного обеспечения SQUID и ISOPLOT/EX [Ludwig, 2000, 2001].

## U-Pb ID-TIMS и SHRIMP данные для цирконов из разных пород Бердяушского массива

Порода	Возраст (млн лет)	MSWD (of concordance)	Probability (of concordance)
#Габбро	1388±28	0,74	0,48
*Кварцевые сиенит-диориты	1372±12	0,15	0,70
*Граниты рапакиви	1369±13	0,31	0,30
**Нефелиновые сиениты	1373±21	0,32	0,26
	1368,4±6,2	0,58	0,14

Примечание. # настоящая работа; \* [Ронкин и др., 2005б]; \*\* [Синдерн и др., 2003; Ронкин и др., 2005в].

**Результаты и интерпретация.** Всего был изучен изотопный состав U-Th-Pb 4-х локальных областей (наибольший размер эллипсообразного «пятна» около 30 микрон) 2-х кристаллов цирконов габбро (рис. 1-2). Экспериментально полученные результаты на графике в координатах  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  демонстрируют (рис. 3) довольно незначительную дискордантность для трех «выстрелов» GA1.1, GA1.2, GA1.3 в пределах кристалла GA1, содержания урана 368, 198, 288, тория 355, 207, 289 ppm соответственно, что, как уже упоминалось выше, является, в большинстве случаев, характерной особенностью метода датирования единичных кристаллов в сравнении с анализом «мультипопуляций» цирконов. Фигуративная точка циркона GA2.1, напротив, имеет дискордантность, достигающую 12 %. Учитывая близость локализации U-Pb данных по циркону GA1, результаты SHRIMP-датирования были калькулированы как конкордантные, определяющие возраст  $1386 \pm 9,9$  млн лет, при  $\text{MSWD} = 0,04$  и высокой вероятности соответствия «probability» = 0,84. Аппроксимация U – Pb данных по обоим кристаллам GA1 и GA2 позволяет вычислить верхнее пересечение конкордии дискордией, которое соответствует возрасту  $1388 \pm 28$  млн лет, при  $\text{MSWD} = 0,74$ , и практически, в два раза меньшей вероятности соответствия «probability» = 0,48, что связано с удаленностью фигуративной точки GA2.1 от начала координат. Нижнее пересечение дискордии с конкордией, в пределах имеющих погрешностей, соответствует нулю. Полученные в настоящей работе U-Pb SHRIMP-возраста для локальных областей цирконов габбро, которые совпадают в пределах наблюдаемых погрешностей с опубликованными нами ранее данными для габбро, кварцевых сиенитов, гранитов рапакиви и нефелиновых сиенитов [Синдерн и др., 2003; Ронкин и др., 2005в], приведены в табл. 1.

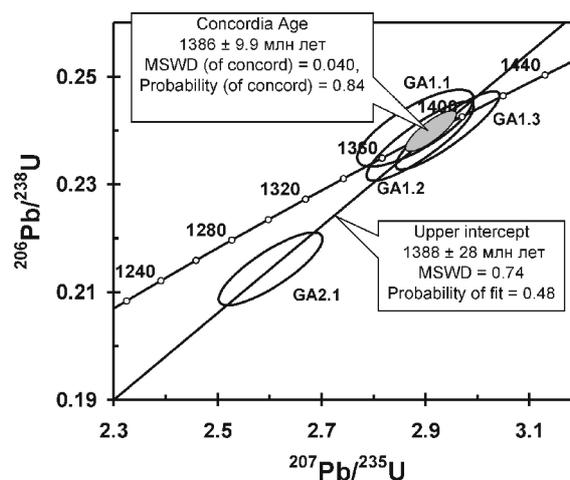


Рис. 3. SHRIMP U-Pb результаты по цирконам из габбро Бердяушского массива.

Таким образом, обсуждаемые U-Pb SHRIMP данные, в сочетании с обнаруженными нами ранее U-Pb ID-TIMS результатами [Синдерн и др., 2003; Ронкин и др., 2005в], определяют более «древнее» возрастное положение всех изученных разностей пород Бердяушского массива [Ронкин и др., 2005б], нежели бытовавшее до настоящей работы [Краснобаев и др., 1984; Краснобаев, 1986]. И, наконец, с учетом данных по геохимии элементов-примесей [Ронкин, 2005а] полученные возраста интерпретируются как время внутриплитного магматизма («within plate»), приведшего, в свою очередь, к формированию гранитов-рапакиви и ассоциирующихся пород.

#### Выводы.

1. В сочетании с анализом катодоллюминесцентных изображений ионный микрозонд высокого разрешения SHRIMP-II дает возможность осуществить U-Pb датирование подходящих, с точки зрения корректной методологии эксперимента, локальных областей (не более 30 мм) в пределах изучаемых кри-

сталлов цирконов для избежания смешения изотопных характеристик полихронных участков кристаллической решетки единичного зерна минерала (обусловленного разными наборами и концентрациями микропримесных элементов, их валентным состоянием и наличием структурных дефектов).

2. Изучение с помощью SHRIMP-II U-Pb систематики единичных кристаллов цирконов габбро, кварцевых сиенит-диоритов, гранитов-рапакиви и нефелиновых сиенитов Бердяшского массива, позволило выявить возраста значимо более древние, чем ранее опубликованная цифра  $1350 \pm 10$  млн лет.
3. С учетом петрогенетических ограничений по элементам-примесям, полученные возраста интерпретируются нами как время внутриплитного магматизма, в результате которого в конечном итоге были сформированы граниты-рапакиви и ассоциирующие породы Бердяшского массива.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Программы № 7 Отделения наук о Земле РАН «Изотопная геология: геохронология и источники вещества».*

#### Список литературы

- Краснобаев А.А.* Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 1986. 148 с.
- Краснобаев А.А., Бибикова Е.В., Степанов А.И. и др.* Геохронология Бердяшского массива // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1984. № 3. С. 3-23.
- Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Попова О.Ю.* Основные геохимические характеристики гранитов рапакиви и ассоциирующих пород Бердяшского плутона. Тектономагматическая позиция и типология. Ежегодник-2004. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005а. С. 211-220.
- Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Матуков Д.И., Лепихина О.П., Попова О.Ю.* «Машакское рифтогенное событие» рифея типовой области (Южный Урал): новые изотопно-геохронологические рамки // XI Конференция «Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере» Сыктывкар, 2005б. С. 305-307.
- 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. № 1. 2005в. С. 135-142.
- Ронкин Ю.Л., Williams I., Матуков Д.И. и др.* Sensitive High Resolution Ion Micro Probe Ion в изотопной геологии. труды XX международной конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество». Черноголовка, 2005. С. 243-244.
- Синдерн С., Ронкин Ю.Л., Крамм У. и др.* U-Pb датирование единичных кристаллов цирконов с применением трассера  $^{205}\text{Pb}/^{233}\text{U}$ : на примере нефелиновых сиенитов Бердяшского массива, Южный Урал // Материалы II Российской конференции по геохронологии. Санкт-Петербург, 2003. С. 461-465.
- Black, L.P., Kamo, S.L., Allen C.M. et al.* TEMORA 1: a new zircon standard for U-Pb geochronology // Chemical Geology. 2003а. V. 200. P.155-170.
- 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. 2003б. V. 200. P. 171-188.
- 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.*
- Ludwig Kenneth R. // Isoplot/Ex ver. 2.49. Berkeley Geochronology Center. Special Publication N. 1а. 2001. 55 p.*
- Ronkin Y.L. and Lepikhina O.P.* Lower Straton of the South Urals Riphean sequence: Rb-Sr and Sm-Nd isotope constrains // Abstracts of International Symposium and Field Workshop on Assembly and Breakup of Rodinia and Gondwana, and Growth of Asia. Osaka, Japan, 2001. P. 256-258.