Литосфера, 2005, № 1, с. 135-142

УДК 549.514.86 : 621.031.86 (470.5)

«IN SITU» U-PB SHRIMP ДАТИРОВАНИЕ ЦИРКОНОВ НЕФЕЛИНОВЫХ СИЕНИТОВ БЕРДЯУШСКОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Ю.Л. Ронкин, Д.**И. Матуков*, СЛ. Пресняков*, Е.Н. Лепехина*, О.П. Лепихина, О.Ю. Попова**

Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН
620151, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7
E-mail: ronkin@r66.ru
**Всероссийский научно-исследовательский геологический институт (ВСЕГЕИ)*
199106, Санкт-Петербург, Средний проспект, 74

Поступила в редакцию 18 мая 2004 г.

Дискуссия о возрасте нефелиновых сиенитов Бердяушского массива расположенного на западном склоне Южного Урала и прорывающего стратотипические рифейские образования Башкирского антиклинория имеет длительную историю. Новые U-Pb данные по девяти единичным цирконам нефелиновых сиенитов, полученные с помощью ионного микрозонда SHRIMP-П определяют верхнее пересечение с конкордией 1373 ± 21 млн лет (MSWD=0.32). С учетом петрогене-нетических ограничений по элементам-примесям возраст 1373 ± 21 млн лет интерпретируется как время внутриплитного магматизма, приведшего, в конечном итоге, к формированию нефелиновых сиенитов Бердяушского массива.

Ключевые слова: *стратотипические образования рифея, U-Pb датирование, цирконы, SHRIMP, нефелиновые сиениты, Южный Урал.*

«IN SITU» U-PB SHRIMP DATING OF ZIRCONS FROM NEPHELINE SYENITES OF BERDAYUSH MASSIF (SOUTHERN URAL)

Y.L.Ronkin, DJ.Matukov*, S.L. Presnaykov*, E.N. Lepekhina*, O.P. Lepikhina, O.Y. Popova

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS
**All Russia Geological Research Institute (VSEGEI)*

Discussion concerning the age of nepheline syenites of Berdayush massif situated on the Western slope of the Southern Urals and intruding the Riphean stratotype formations of the Bashkirian anticlinorium has a long history. New U-Pb data on nine single zircons from nepheline syenites analyzed by SHRIMP-II ion microprobe determined the top intersection with concordia as 1373 ± 21 Ma (MSWD=0.32). Taking into account trace element petrogenetic constraints, the age 1373 ± 21 Ma is interpreted as time of within plate magmatism, which resulted, finally, in formation of Berdayush rapakivi granites and related nepheline syenites.

Key words: *stratotype of Riphean, U-Pb dating, zircons, SHRIMP, nepheline syenites, Southern Ural.*

Описание проблемы и выбор способа ее решения

Бердяушский массив, расположенный на западном склоне Южного Урала, издавна привлекает внимание многих исследователей по крайней мере, по двум причинам. С одной стороны, это исключительная сложность строения, совмещение на небольшом участке (около 30 кв. км) основных пород, гранитов-рапакиви, нефелиновых и безнефелиновых сиенитов, диабазовых даек. С другой стороны, примечатель-

ная особенность массива обусловлена его стратиграфическим положением, поскольку рифейские отложения Башкирского антиклинория Южного Урала являются стратотипом, а граниты-рапакиви Бердяушского массива, прорывающие карбонатные отложения саткинской свиты, по сути дела определяют верхнюю границу нижнего рифея, датируемую возрастом 1350 ±10 млн. лет. Эта цифра была получена в результате реализации комплексных работ (и том числе с участием некоторых авторов этой статьи [Краснобаев и др., 1984]) с применением нескольких методов изотопного датирования: K-Ar – по минералам, Rb-Sr – по породам в целом и U-Pb – по акцессорным цирконам. И если объем изотопного опробования основных разновидностей пород K-Ar и Rb-Sr методами более или менее состоятелен (и был развит дополнительно впоследствии [Ronkin and Lepikliina, 2001]), то относительно U-Pb датирования цирконов нефелиновых сиенитов в литературе до [Синдерн и др., 2003] и настоящей работы фигурируют сведения всего лишь о двух фигуративных точках в координатах $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ и возрастами по отношениям $^{207}Pb/^{206}Pb$ – 1086 и 1302 млн. лет и коэффициентами конкордантно-сти 97.6% и 98.3% соответственно [Краснобаев, 1986]. При этом, в соответствии с аналитическими возможностями того времени, 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. и т.п.) выделяемых «монофракций» цирконов. Очевидно, что результаты датирования такого «сообщества», 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 экспериментальнополученных 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 ксеиогеииым 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 [Lancelot et ai., 1976; Scharer & Allegre, 1982; Steiger et. al, 1993; Wendt, 1993]. 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 [Lancelot et al., 1976; Scharer & Allegre, 1982; Steiger et al., 1993; Wendt, 1993], 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 локализуются либо вблизи, либо непосредственно на конкордии, что позволяет минимизировать погрешности, связанные с проецированием значительной дискордантности на конкордию.

Первые результаты по U-Pb датированию индивидуальных зерен циркона, выделенных из нефелиновых сиенитов Бердяушского массива с применением смешанного трассера $^{205}Pb/^{233}U$, одновременного разложения нескольких кристаллов в тефлоновой капсуле и дальнейшего масс-спектрометрического анализа без хрома-тографического разделения РЬ и U были опубликованы в работе [Синдерн и др., 2003] и характеризуются возрастом 1368.4 ± 6.2 млн. лет, что значительно древнее ранее опубликованных данных [Краснобаев, 1986]. В связи с вышеизложенным датирование индивидуальных кристаллов циркона, выделенных из нефелиновых сиенитов Бердяушского массива, представляется весьма актуальным направлением. В настоящей работе публикуются первые U-Pb данные по цирконам нефелиновых сиенитов Бердяушского массива, полученные с помощью прибора SHRIMP-II (**S**ensitive **H**igh **R**esolution **I**on **M**icro **P**robe II), представляющего собой прецизионный вторично-ионный микрозонд высокого разрешения производства фирмы ASI (Австралия). Этот прибор представляет собой инструмент новейшего поколения, который был специально разработан для высокоточных U-Pb изотопно-геохронологических исследований вещества на микроуровне в единичных кристаллах циркона, монацита и других минералов

[Ireland, 1995; Williams, 1998]. SHRIMP-II позволяет производить «точечные» определения изотопного возраста по генетически различным микрозонам, микродоменам и ядрам минералов благодаря совершенной фокусировке первичного ионного пучка.

Анализируемый материал и его подготовка

В работе были использованы образцы, отобранные авторами в результате полевых работ 1998-2004 гг. Выделение цирконов из нефелиновых сиенитов 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 бинокуляром. Для анализа были выбраны девять относительно прозрачных с минимальным количеством включений единичных кристаллов отображенных на рис. 1. Выбранные индивиды совместно со стандартами (более подробно о стандартах ниже) были зафиксированы смолой Epofix 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. Полученные картинки позволяют выбрать подходящие, с точки зрения методологии эксперимента, координаты точки локального микрозондового исследования в пределах изучаемых кристаллов цирконов для дифференциации изотопных характеристик полихронных участков кристаллической решетки единичного зерна минерала (обусловленных разными наборами и концентрациями микропримесных элементов, их валентным состоянием и наличием структурных дефектов), что достигается путем визуальной навигации в интенсивностях светлых и темных (и соответственно обогащенных ураном) областей (рис. 1).

Подготовленная описанным выше способом шайба с цирконами загружалась в шлюз SHRIMP-II. Принцип работы SHRIMP-II (рис. 2) основан на том, что пучок ионов $^{16}O_2^-$ кислорода, ускоряемых напряжением до 10 kV фокусируется оптикой Колера 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 двойной фокусировкой, где разделяются по массам и энергиям, попадая в приемную щель регистрирующего канала. Высокое разрешение SHRIMP-II (более 5000) позволяет производить практически полное разделение изотопов свинца и урана от мешающих изобарных наложений (Zr_2O, HfO_2, HfSi), характерных для спектра вторичных ионов (рис. 3), эмитированных цирконовой мишенью, при этом чувствительность анализатора составляет 20 имп/сек на 1 нА первичного пучка, на 1 ppm концентрации ^{206}Pb в цирконе, что позволяет уверенно измерять возраст большинства образцов, вплоть до кайнозойских. Эта особенность SHRIMP-II является принципиальной – именно она позволяет использовать микрозонд для изотопных

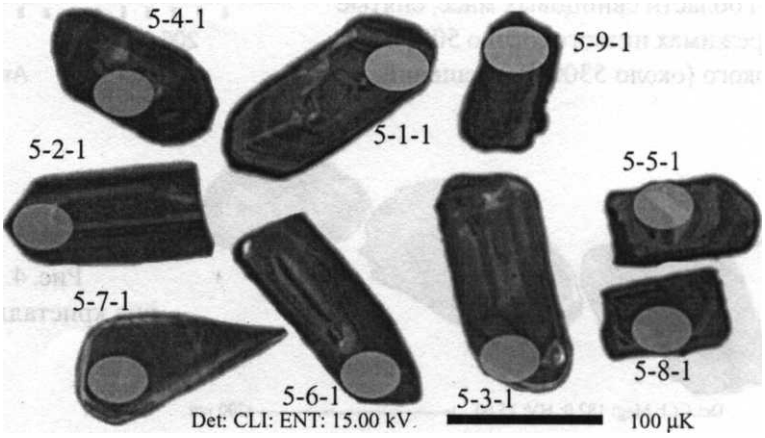

Рис. 1. Катодолюминесцентные изображения девяти единичных кристаллов цирконов нефелиновых сиенитов Бердяушского массива датированных SHRIMP-II.

Эллипсы на кристаллах демонстрируют размеры и локализацию соответствующих кратеров после ионной бомбардировки.

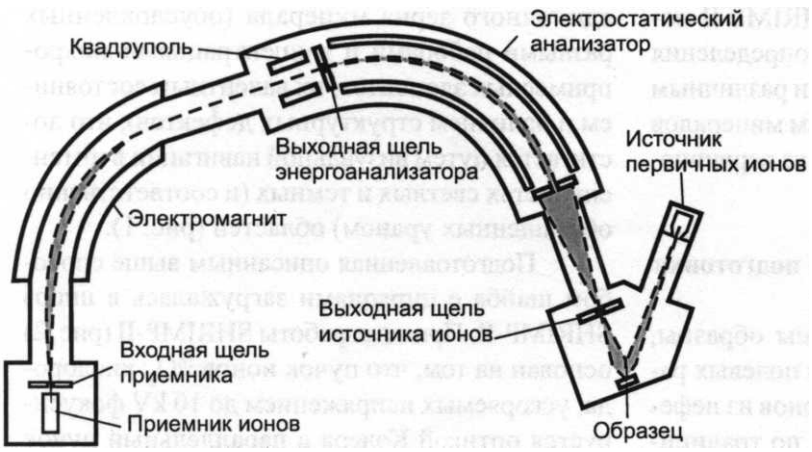

Рис. 2. Схема ионного микрозонда SHRIMP-II.

U-Pb измерений. Однако при первых же попытках определения в цирконах U/Pb отношений с помощью SHRIMP-II, выяснилось, что мишенью производится уран как в виде металлических, так и окисных и двуокисных ионов в соотношении приблизительно: $UO_2^+/UO^+/U^+$~3:7:1, в то время как свинец представлен почти нацело металлической формой - $РЬ^+$. 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. Таким образом, поскольку прямые измерения атомных отношений для определения возраста минерала оказались бессмысленными, единственным путём реализации уникальных аналитических возможностей прибора являются измерения, построенные 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 хорошо определенным U/Pb отношением. При этом упомянутое отношение должно быть неизменным как внутри единичного зерна, так и между различными зернами стандартного циркона. В настоящей работе, в качестве возрастных цирконовых стандартов использовались SL13,91500 и TEMORA [Black et al., 2003, 2003A]. Многолетние, многочисленные исследования TEMORA как с помощью SHRIMP-II, так и классическим методом изотопного разбавления (ID-TIMS) показали, что он является в высокой степени конкордантным и гомогенным по U/Pb отношению, т.е. являет собой пример «закрытой» изотопной U-Pb системы. Любопытно, что гомогенность по U/Pb отношению в этом цирконе не сопровождается таковой по концентрации урана. Более того, уран распределен крайне неравномерно, что от-

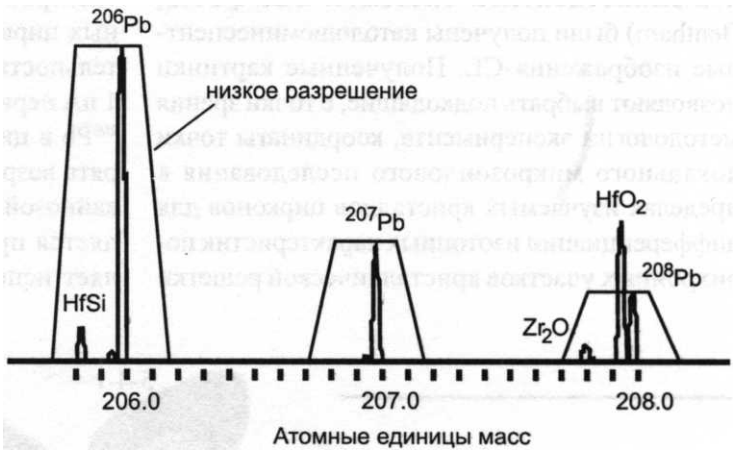

Рис. 3. SHRIMP-II масс-спектры области свинцовых масс, снятые в режимах низкого (около 500) и высокого (около 5300) разрешений.

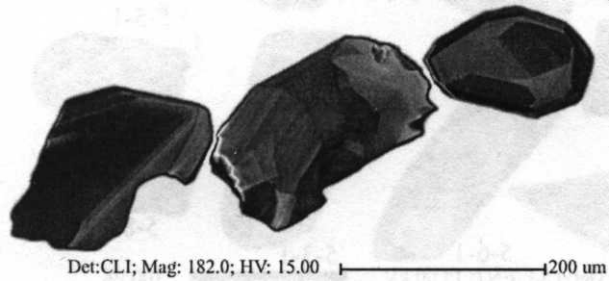

Рис. 4. Катодолюминесцентное изображение кристаллов цирконов TEMORA.

ражается в наличии четко проявленной секториальной зональности на катодолюминесцентных изображениях (рис. 4). Принятое отношение $^{206}Pb/^{238}U$ в этом цирконе соответствует возрасту 416.75 ± 0.24 млн. лет [Black et al., 2003].

Режим измерений

Формирование пучка ионов кислорода $^{16}O_2^-$ и его фокусировка осуществлялась посредством штатной программы «первичная колонна», позволяющей выбирать из всего спектра ионов, образующихся в дуоплазматроне (NO_2, OH, O_2, O), исключительно ионы молекулярного кислорода $^{16}O_9^-$ и, с помощью настройки потенциалов ОТКлоняющих пластин и линз первичной колонны, получать стабильный первичный пучок с энергией 10 кВ. Величина ионного тока контролировалась монитором первичного пучка и устанавливалась от 4 до 8 нА, в зависимости от выбора апертуры, задающей диаметр пучка на поверхности исследуемого образца. Сфокусированный пучок $^{16}O_2^-$ направлялся на поверхность кристалла стандарта, вызывая эмиссию вторичных ионов свинца и урана, которые вытягивались из области ионизации с помощью так называемой «вытягивающей» электростатической линзы. Далее вторичный ионный пучок формировался системой линз, называемой вторичной колонной, и направлялся в собственно масс-анализатор. На первом этапе, с использованием стандартов, производилась настройка вторичной колонны посредством программы «вторичная колонна» и уточнялась калибровка шкалы масс прибора. Величина вторичного пучка контролировалась монитором вторичного пучка и отслеживалась электронным умножителем расположенном непосредственно за приемной щелью в режиме счета импульсов. После завершения всех настроек и калибровок производилось измерение изотопного состава свинца и U/Pb 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 $^{90}Zr_2O$, ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb, ^{238}U, $^{232}Th^{16}O$, и $^{238}U^{16}O$. 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 Pb и U/Pb отношения в интересующей точке в течение 10-15 минут для достижения необходимой статистической погрешности. Цирконовые стандарты TEMORA, 91500 и SL13 [Black et al., 2003, 2003A] анализировались через каждые 4-5 анализов испытуемых образцов. На последнем этапе производилась обработка полученной аналитической информации с использованием программного обеспечения SQUID и ISOPLOT7EX. [Ludwig, 2000, 2001].

Результаты

Экспериментально полученные результаты (табл. 1) на графике (рис. 5) в координатах $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ демонстрируют довольно незначительную дискордантность, за исключением первой, второй (снизу вверх, ниже конкордии) и последней (выше конкордии) фигуративных точек (дискордантность +7.46%, +6.12% и -5.2% соответственно (таблица)), что как уже упоминалось выше, является, в большинстве случаев, характерной особенностью метода датирования единичных кристаллов в сравнении с анализом «мультипопуляций» цирконов. Аппроксимация полученных девяти фигуративных

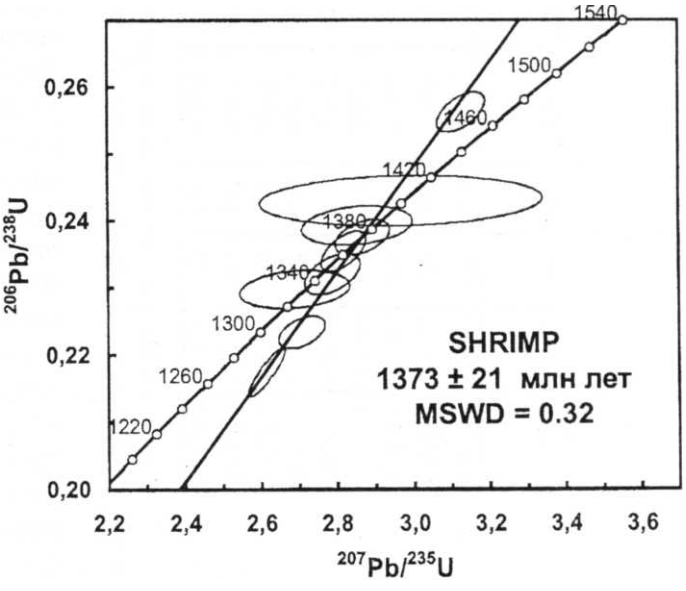

Рис. 5. График с конкордией для цирконов нефелиновых сиенитов Бердяушского массива.

«In situ» U-Pb результаты по цирконам нефелиновых сиенитов Бердяушского массива полученные с помощью SHRJMP-II

точка, №	$^{206}Pb_c$ %	U г/т	Th г/т	$^{232}Th/^{238}U$	$^{206}Pb^*$ г/т	(1) $^{206}Pb/^{238}U$ Возраст млн лет		(1) $^{207}Pb/^{206}Pb$ Возраст млн лет		(1) $^{208}Pb/^{232}Th$ Возраст, млн лет		(2) D %	(1) $^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±%	(1) $^{207}Pb^*/^{235}U$	±%	(1) $^{206}Pb^*/^{238}U$	±%	(3) Rho
NS5.4.1	0,0814	1015	688	0,701	190	1269	±13	1364	±10	1394	±17	7,5	0,0871	0,5	2.614	1.2	0.2176	1,1	0,90
NS5.2.1	1,3271	818	956	1,207	159	1300	±8.4	1380	±25	1329	±14	6,1	0.0879	1.3	2.707	1.5	0.2234	0,7	0,48
NS5.7.1	2,2466	468	981	2,165	94,6	1334	±9.7	1313	±67	1295	±17	-1,6	0.0849	3.5	2.689	3.6	0.2298	0,8	0,23
NS5.3.1	0,1242	307	443	1,489	61,3	1345	±10	1363	±29	1390	±15	1,3	0.0871	1.5	2.788	1.7	0.2321	0,9	0,50
NS5.1.1	0,3851	597	730	1,262	121	1363	±10	1356	±21	1361	±16	-0,5	0,0868	1.1	2.818	1.4	0.2355	0,9	0,61
NS5.8.1	1,6831	963	1107	1,188	200	1374	±9.1	1372	±28	1226	±21	-0,1	0.0875	1.5	2.867	1.6	0.2376	0,7	0,45
NS5.6.1	1,9264	750	571	0,787	157	1383	±10	1349	±63	1429	±42	-2,5	0.0865	3.2	2.854	3.3	0.2393	0,8	0,24
NS5.9.1	8,5753	541	467	0,893	123	1402	±13	1396	±160	1483	±73	-0,4	0.0886	8.2	2.97	8.3	0.243	1,0	0,12
NS5.5.1	0,5130	515	196	0,392	114	1471	±10	1394	±21	1767	±30	-5,2	0,0885	1.1	3.128	1.3	0.2563	0,8	0,57

Примечание. Погрешности указаны на уровне 1a, РЬ и РЬ* означают доли обыкновенного и радиогенного свинца соответственно. Погрешность в калибровке стандартов составляла 0.43%. (1) – поправка на обыкновенный свинец вносилась по ^{204}РЬ. (2) – **D** – дискордантность. (3) – **Rho** – коэффициент корреляции.

точек дискордиеи, позволяет определить верхнее пересечение с конкордией соответствующее возрасту 1373 ± 21 млн. лет (MSWD-0.32).

Обсуждение результатов

Если, как уже говорилось выше, по гранитам-рапакиви, кварцевым сиенит-диоритам вновь полученные [Ronkin et al., 1996; Ronkin & Lepikhina. 2001] данные, несмотря на абсолютное удревнение, все-таки более или менее вписываются в интервал погрешностей опубликованных ранее, то по нефелиновым сиенитам дискуссия приобретает новый оборот. Полученный в настоящей работе изохронный U-Pb возраст 1373 ± 21 млн. лет значительно древнее опубликованных в работе [Краснобаев, 1986]) «омоложенных» данных (две дискордантные фигуративные точки в координатах ^{207}РЬ/^{235}-U ^{206}Pb/^{23S}U) с возрастами по отношениям ^{207}РЬ/^{206}РЬ 1086 и 1302 млн. лет), что требует какого-то вразумительного объяснения. Первая, на наш взгляд, причина, как уже отмечалось выше, заключается в том, что из-за отсутствия в те годы аппаратуры и «химии» позволяющей анализировать единичные кристаллы цирконов, было выполнено U-Pb датирование миллиграммовых количеств, сотен, тысяч индивидуальных зерен цирконов, которые, вероятно, представляли собой смесь зерен цирконов с разной геологической историей. Вторым моментом, усложняющим достоверность полученных результатов, является тот факт, что проанализированные цирконы были представлены (цитата стр. 118 [Краснобаев, 1986]) *«.„кристаллами и их обломками довольно крупного размера (0.3-0.6 мм), серого и розового цвета, со всеми стадиями перехода между разноокрашенными частями.... Дробление и воздействие метасоматических растворов привели к частичному замещению розовой разновидности I более поздней, серой метамиктной II через промежуточные II п. Низкая устойчивость раннего материала, связана, очевидно, с иной, не автометасомАтической, природой растворов, что допускАет и значительный временной разрыв между разновидностями».* Типичные представители этих цирконов продемонстрированы на рис. 6. Таким образом, резюмируя методологию подбора материала для проведенного U-Pb датирования в рамках работы [Краснобаев, 1986, можно констатировать, что в анализируемом материале наблюдается наложение как минимум двух, ус-

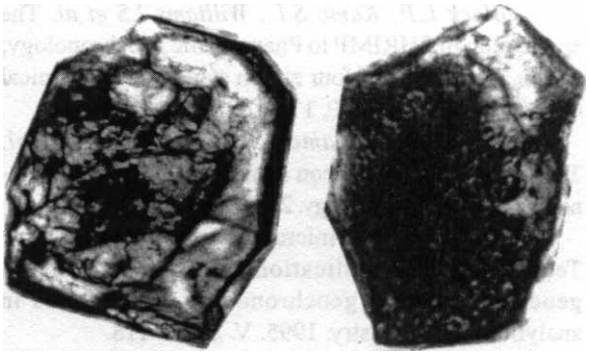

Рис. 6. Цирконы из «миллиграммовой» популяции нефелиновых сиенитов Бердяушского массива проанализированные в рамках работы [Краснобаев, 1986].

ложняющих получение достоверной геохронологической информации факторов: с одной стороны, налицо неоднородность индивидуальных кристаллов, а с другой – их суперпозиция, обязанная «миллиграммовым» количествам (сотням и тысячам кристаллов), приводящая в итоге к неизбежному «усреднению» измеренных результатов, что отражается в значительной дискордантности полученных возрастов – 1086 и 1302 млн. лет (по отношениям ^{207}Pb/^{206}Pb), и является главным недостатком анализа с использованием относительно «больших» исходных навесок цирконов.

Рассматривая же цифру 1373±21 млн. лет полученную в настоящей работе, можно отметить, что близкие к обсуждаемому здесь (изохронному!) возрасту (с учетом погрешностей) были получены нами [Синдерн и др., 2003] ранее (1368.4 ± 6.2 млн лет), с помощью U-Pb датирования индивидуальных зерен циркона выделенных из нефелиновых сиенитов Бердяушского массива с применением смешанного трассера ^{205}Pb/^{233}U, одновременного разложения нескольких кристаллов в тефлоновой капсуле и дальнейшего масс-спектрометрического анализа без хроматографического разделения Pb и U. Таким образом, двумя независимыми методами, «in situ» ионным микрозондом (SHRIMP-II) и масс-спектрометрическим методом изотопного разбавления с окончанием на твердофазном анализаторе (ID-TIMS), подтверждается более «древнее» возрастное положение нефелиновых сиенитов, нежели бытовавшее до настоящей работы. И, наконец, с учетом данных по геохимии элементов-примесей [Ронкин и др., 2005], полученный возраст интерпретируется как время внутриплитного магматизма приведшего, в свою очередь, к формированию А-гранитов-рапакиви и ассоциирующих нефелиновых сиенитов.

Выводы

1. В сочетании с анализом катодолюминесцентных изображений ионный микрозонд высокого разрешения SHRIMP-II дает возможность осуществить U-Pb датирование подходящих, с точки зрения корректной методологии эксперимента, локальных областей в пределах изучаемых кристаллов цирконов для дифференциации изотопных характеристик полихронных участков кристаллической решетки единичного зерна минерала (обусловленную разными наборами и концентрациями микропримесных элементов, их валентным состоянием и наличием структурных дефектов).

2. Применение описанной выше методики U-Pb датирования с помощью SHRIMP-II, позволило датировать единичные кристаллы цирконов нефелиновых сиенитов Бердяушского массива изохронным возрастом 1373±21 млн. лет (MSWD=0.32), что значительно древнее опубликованных ранее цифр.

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

Список литературы

Краснобаев А.А., Бибикова Е.В., Степанов А.И. и др. Геохронология Бердяушского массива // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1984. № 3. С. 3-23.

Краснобаев А.А. Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 1986. 148 с.

Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Попова О.Ю. Тектономагматическая позиция и типология гранитов рапакиви и ассоциирующих пород Бердяушского плутона: петрогенетические ограничения по элементам примесям // Научные чтения пямяти П.Н. Чирвинского. Выпуск 7. Пермь, 2005. С. 278-285.

Синдерн С, Ронкин Ю.Л., Крамм У. и др. U-Pb датирование единичных кристаллов цирконов с применением трассера ^{205}Pb/^{233}U: на примере нефелиновых сиенитов Бердяушского массива, Южный Урал // Материалы II Российской конференции по геохронологии «Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза». Санкт-Петербург, 2003. С. 461-465.

Black L.R, Kamo S.L., Williams LS et al The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology; a critical appraisal of four zircon standards // Chemical Geology. 2003A. 200. P. 171-188.

Black, L.R, Kamo, S.L, Allen CM. et al TEMORA 1: a new zircon standard for U-PЪ geochronology// Chemical Geology. 2003.200. P. 155-170.

Ireland L.R. Ion microprobe mass-spectrometry: Techniques and applications in cosmochemistry, geochemistry, and geochronology // Advances in analytical geochemistry. 1995. V. 2. P. 1-118.

Lancelot J, Vitrac A. and Allegre C J. Uranium and lead isotopic dating with grain-by-grain zircon analysis: A study of complex geological history with a single rock//Eatrh Planet. Sci. Lett., 1976. 29. P. 357-366.

LudwigKenneth R. Isoplot/Ex ver. 2.49. Berkeley Geochronology Center. Special Publication No. la. 2001. 55 p.

Ludwig K.R. SQUID 1.00. A User's Manual // Berkeley Geochronology Center Special Publication. N 2. 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, 2000. USA.

Roddick J.C., Loveridge W.D. and Parrish R.R. Precise U/Pb dating of zircon at the sub-nanogram Pb level // Chemical Geology (Isotope Geoscience Section). 1987. 66. P. 11-121.

Ronkin Y.L. and O. RLepikhina. 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.

Ronkin Y.L., Nesbitt, R.W., Lepikhina O.P., Shchulkin V.E, Isotope geology and geochemistry of the Berdyaush rapakivi and related rocks complex (South Urals, Russia) // Symposium «Granite Rapakivi and Related Rocks». Helsinki. Finland. 1996. P. 56.

Scharer U. andAllegre C J. Uranium-lead system in fragments of single zircon grain. Nature. 1982. 295. P. 585-587.

Steiger R.H., Bickel R.A. and Meier M. Conventional U-Pb dating of single fragments of zircon forpetrogenetic studies of Phanerozoic granitoids. Earth Planet. Sci. Lett. 1993. 115. P. 197-209.

WendtJJ. Ph. Dissertation. Early Archean crustal evolution in Swaziland, S. Africa, as revealed by the combined use of zircon geochronology, Pb-Pb and Sm-Nd systematics. Mainz. 1993. 123 p.

Wetherill G. *W* Discordant uranium-lead ages // Trans. Amer. Geophys. Union, 1956. 37. P. 320-326.

Williams L.S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe //Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology. 1998. 7. P. 1-35.

Рецензент член-корр. РАН В.Н. Пучков