

SHRIMP U-Pb ДАТИРОВАНИЕ ЕДИНИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ ЦИРКОНА НЕФЕЛИНОВЫХ СИЕНИТОВ БЕРДЯУШСКОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

**Ю.Л. Ронкин, Д.И. Матуков, С.Л. Пресняков, А.В. Маслов, Е.Н. Лепехина,
О.П. Лепихина, О.Ю. Попова**

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, разнообразных диабазовых даек. С другой стороны, примечательная особенность массива обусловлена его стратиграфическим положением, поскольку рифейские отложения Баш-

кирского 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 этих тезисов [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 опробова-

ния основных разновидностей пород K-Ag и Rb-Sr методами более или менее состоятельны (и был развит дополнительно впоследствии [Ronkin et al., 2001]), то относительно U-Pb датирования цирконов нефелиновых сиенитов в литературе [Краснобаев, 1986] фигурируют сведения всего лишь о двух фигуративных точках в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и возрастaми по отношениям $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 1086 и 1302 млн лет и коэффициентами конкордантности 97.6% и 98.3% соответственно. 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. 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 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 возможность датирования единичных кристаллов цирконов и даже их фрагментов [Lancelot et al., 1976; Schdrer & Alligre, 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; Schdrer & Alligre, 1982; Steiger et al., 1993; Wendt, 1993], в подавляющем большинстве случаев полученные данные имеют меньшую конкордантность и большую точность в сравнении с анализом значительных по объему концент-

ратов 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.

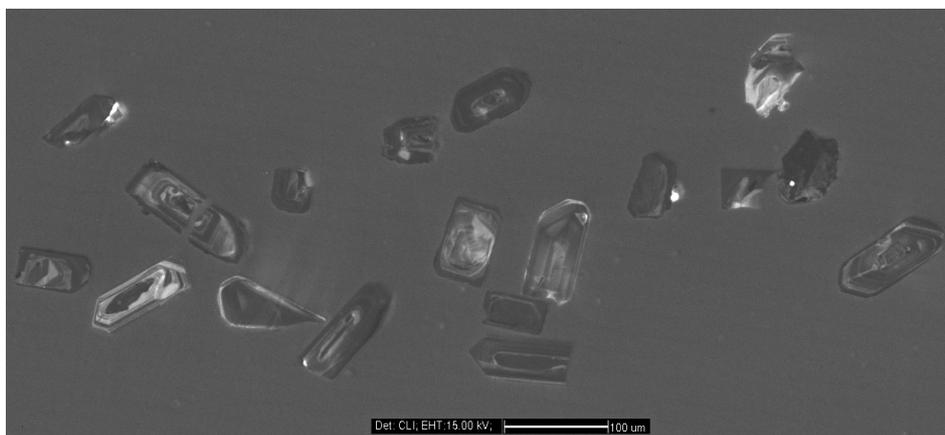
Первые результаты по U-Pb датированию индивидуальных зерен циркона, выделенных из нефелиновых сиенитов Бердяушского массива, с применением смешанного трассера $^{205}\text{Pb}/^{233}\text{U}$, одновременного разложения нескольких кристаллов в тefлоновой капсуле и дальнейшего масс-спектрометрического анализа без хроматографического разделения Pb и U были опубликованы в работе [Sindern, 2003] и характеризуются возрастом 1368.4 ± 6.2 млн лет, что значительно древнее ранее опубликованных [Краснобаев, 1986]. В связи с вышеизложенным, датирование индивидуальных кристаллов циркона, выделенных из нефелиновых сиенитов Бердяушского массива, представляется весьма актуальным направлением. В настоящей работе публикуются впервые полученные U-Pb данные по цирконам нефелиновых сиенитов Бердяушского массива, произведенных с помощью Shrimp II (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe II), представляющим 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. Прибор применим для анализа как положительно заряженных ионов (с использованием кислородного зонда), так и отрицательно заряженных ионов (цезиевый зонд). Высокое масс-разрешение прибора достигается использованием двойной фокусировки (по энергиям и массам) и рекордно большим радиусом поворота магнита (около 1 м), а также электростатического анализатора (1.27 м). Подобные геометрические параметры аналитической части анализатора определяют длину траектории ионного пучка от выходной щели до при-

емной более 7 м (!), что в конечном итоге находит свое отражение в солидном весе прибора, превышающем 12 тонн.

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 биноклем. Для анализа были выбраны семь относительно прозрачных с минимальным количеством включений единичных кристаллов из числа отображенных на рисунке 1. Выбранные индивидуумы промывались ацетоном и этанолом, и далее совместно со стандартами (более подробно о стандартах ниже) были наклеены на двустороннюю липкую поверхность (зафиксированную в свою очередь на плоском куске пластика) в пределах формообразующего кольца из фторопласта диаметром 25 мм и далее залиты эпоксидной смолой EpoFix объемом около 2.8-3.0 мл. Кристаллы анализируемых цирконов и стандартов размещались таким образом, чтобы расстояние между кристаллами составляло 20-30 мкм, а цирконы, выделенные из каждой отдельной пробы, образовывали обособленную группу в пределах поверхности шайбы, при этом стандарты имплантировались в центральную часть матрицы. Количество цирконов стандарта, необходимое для анализа, рассчитывалось, исходя из соотношения: одно измерение стандарта

на 2-3 анализа исследуемых минералов. После застывания смолы (3-5 дней), поверхность матрицы, содержащая исходные цирконы и представляющая собой цилиндрическую шайбу толщиной около 7 мм, шлифовалась абразивом с размерностью зерен от 6 до 3 мкм до выведения кристаллов на поверхность и достижения параллельности обеих, фронтальной и тыловой, поверхностей в пределах $\pm(1-1.5)$ мм, а затем, после соответствующей промывки, полировалась алмазным абразивом 1-1/4 микрона для получения максимально плоской (допустимые отклонения от плоскости ± 5 мкм) и гладкой поверхности, поскольку царапины, каверны, равно как и рельеф любого рода, в значительной мере нарушают процесс эмиссии вторичных ионов при производстве изотопного анализа. По завершении полировки, матрица тщательно чистилась с использованием ультразвука. Очистка матрицы производилась циклами по 10-15 минут: в дистиллированной воде (2-3 раза), затем в слабощелочном лабораторном детергенте (типа Deconex), окончательно 2-3 раза в дистиллированной воде. Процедура отмычки совершалась в специализированных чистых боксах и вытяжных шкафах. Очищенная матрица с цирконами переносилась в камеру вакуумного катодного напылителя. Далее на поверхность шайбы наносился тонкий слой золота (чистотой 99,999%), с целью снятия электрического заряда с поверхности матрицы при катодолюминесцентных наблюдениях и проведении вторично-ионных масс-спектрометрических исследований. Напыление проводилось при давлении $1 \times 10^{-1} - 9 \times 10^{-2}$ мбар в течение одной минуты при токе ~ 20 мА. Толщина создаваемого слоя составляла около 100-150 Å. После напыления и

Рис. 1. Катодолюминесцентные изображения единичных кристаллов цирконов нефелиновых сиенитов Бердяшского массива из сообщества которых семь цирконов было датировано SHRIMP.



напуска атмосферы в камеру напылителя, матрица с цирконами извлекалась и переносилась в камеру сканирующего электронного микроскопа (CamScan MX2500 с катодоллюминесцентной системой CLI/QUA2, Bentham) для получения катодоллюминесцентных изображений, что является существенным моментом в подготовке анализируемого материала к дальнейшему изотопному анализу. Используемый прибор, предназначенный для наблюдения микрообъектов при увеличениях от $8\times$ до $500000\times$, исследования их топографии (морфологических элементов поверхности), фазовой неоднородности и позиционирования электронного пучка для последующих рентгеновских и катодоллюминесцентных измерений, представляется абсолютно необходимым инструментом при решении изотопно-геохимических и геохронологических задач на современном уровне, поскольку растровая электронная микроскопия и катодоллюминесценция играют важнейшую роль на этапе предварительного минералогического изучения вещества, подлежащего дальнейшему U-Pb датированию. К примеру, в случае неравномерного вхождения микропримесей в процессе кристаллизации цирконов, даже тончайшие зоны роста кристаллов будут иметь разные характеристики катодоллюминесцентного спектра, что делает эти зоны визуально различимыми и позволяет выявлять внутреннюю морфологию кристаллов и эволюцию кристаллографических форм. Полученные с помощью SEM катодоллюминесцентные картинки позволяют окончательно определиться в выборе наиболее корректного и эффективного метода изотопного анализа, и, что особенно важно в данном случае, выбрать подходящие, с точки зрения методологии эксперимента, координаты точки локального

микронного исследования в пределах изучаемых кристаллов цирконов для избежания смешения изотопных характеристик полихронных участков кристаллической решетки единичного зерна минерала (обусловленную 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) Поскольку катодоллюминесцентные наблюдения не являются количественными измерениями, они проводились в следующих, не жестко фиксированных условиях геометрии и рабочих параметров SEM: рабочее расстояние от полюсного наконечника до поверхности образца в пределах 15-25 mm; ускоряющее напряжение – 15 kV; величина поглощенного тока составляла не менее 2 nA для получения необходимого контраста, и не более 3.5 nA для избежания локального разогрева и коррозии матрицы-держателя.

Далее, подготовленная описанным выше способом, шайба с цирконами загружалась в шлюз Shrimp II. Принцип работы Shrimp II (рис. 2) основан на том, что пучок ионов $^{16}\text{O}_2^+$ кислорода (или цезия), ускоряемый напряжением до 10 kV, 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. Высокое разрешение SHRIMP-II (более 5000) позволяет производить практически полное разделение изотопов

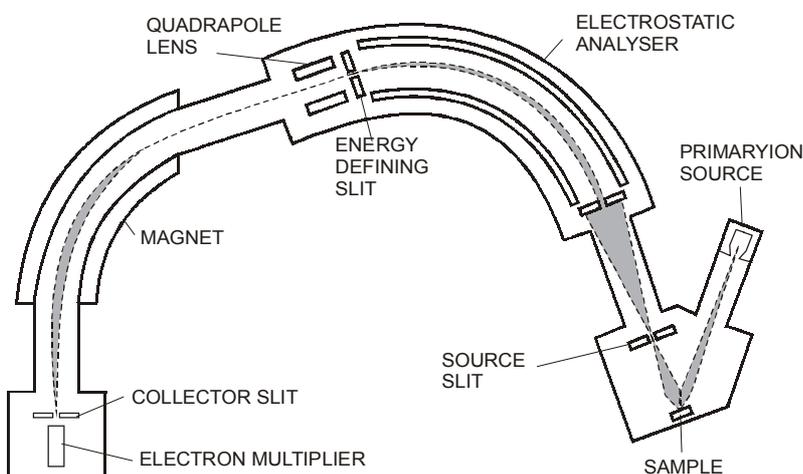
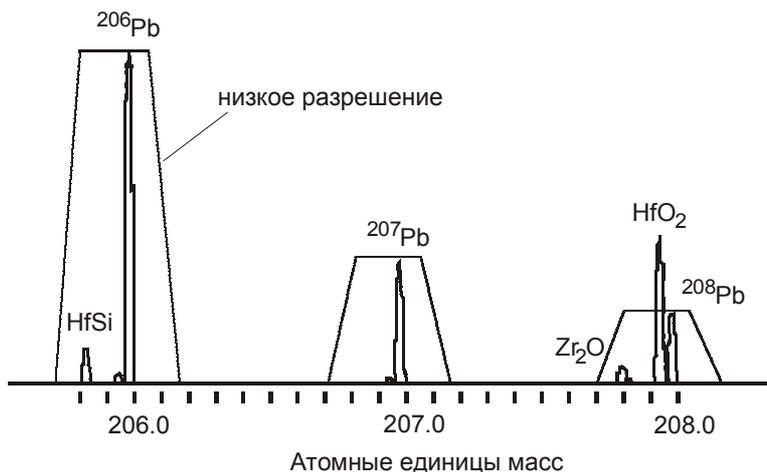


Рис. 2. Схема ионного микрозонда SHRIMP-II.

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



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 уран-свинцовых измерений. Однако при первых же попытках определения в цирконе уран-свинцовых отношений с помощью SHRIMP-II, выяснилось, что мишенью производится уран как в виде металлических, так и окисных и двуокисных ионов в соотношении приблизительно: $UO_2^+/UO^+/U^+ \sim 3:7:1$, в то время как свинец представлен почти нацело металлической формой – Pb^+ . В силу этого получаемые в результате прямых измерений ионные отношения Pb^+/U^+ являются в сильнейшей степени искаженными по сравнению с истинными атомными уран-свинцовыми 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 уран-свинцовым 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 из лейкогаббро Middledale (Лакланский складчатый пояс, Восточная Австралия) [Black & Kamo, 2003]. Многолетние многочисленные исследования TEMORA как на SHRIMP, так и классическим методом изотопного разбавления (ID-TIMS) показали, что он является в высокой степени конкордантным и гомогенным по уран-свинцовому отношению, т.е. является пример «закрытой» изотопной U-Pb системы [Wetherill, 1956]. Любопытно, что гомогенность по уран-свинцовому отношению в этом цирконе не сопровождается таковой по концентрации урана. Более того, уран распределен крайне неравномерно, что отражается в наличии четко проявленной секториальной зональности на катодолюминесцентных изображениях (рис. 4). Принятое отношение $^{206}Pb/^{238}U$ в этом цирконе составляет 0.0665, что соответствует возрасту 416.75 млн лет.

Режим измерений. Формирование пучка ионов кислорода $^{16}O_2^-$ и его фокусировка осуществлялись посредством штатной программы «первичная колонна», позволяющей выбирать из всего спектра ионов, образующихся в дуоплазматроне (NO_2 , OH , O_2 , O), исключительно ионы молекулярного кислорода $^{16}O_2^-$ и, с помощью настройки потенциалов отклоняющих пластин и линз первичной колонны, получать стабильный первичный пучок с энергией 10 кВ. Величина этого 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. Вторичные положительно заряженные ионы вытягивались из области ионизации с по-

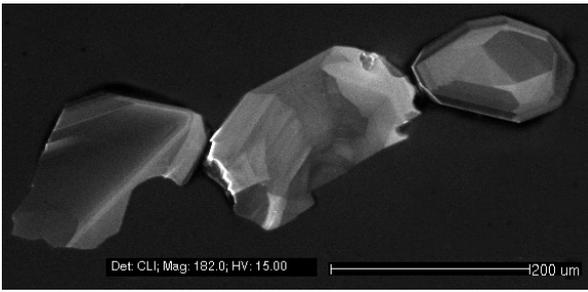


Рис. 4. Катодолюминесцентное изображение кристаллов циркона TEMORA.

мощью 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 стандартного циркона, 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, расположенным непосредственно за приемной щелью в режиме счета импульсов. После завершения всех настроек и калибровок, производилось измерение изотопного состава свинца и уран – 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}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{238}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 выб-

ранную на основании предварительного изучения катодолюминесцентных изображений зону кристалла. Производилось измерение изотопного состава Pb 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 испытуемых образцов. На последнем этапе производилась обработка полученной аналитической информации с использованием программного обеспечения SQUID и ISOPLOT/EX. [Ludwig, 2000, 2001].

Результаты. Экспериментально полученные результаты на графике (рис. 5) в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ демонстрируют довольно незначительную дискордантность, за исключением первой и последней фигуративных точек (коэффициент конкордантности 7 и -5 соответственно), что, как уже упоминалось выше, является в большинстве случаев характерной особенностью метода датирования единичных кристаллов в сравнении с анализом «мультипопуляций» цирконов. Аппроксимация полученных 7 фигуративных точек дискордией позволяет определить верхнее пересечение с конкордией, соответствующее возрасту 1373 ± 12 млн лет (MSWD=1.5). Нижняя точка пересечения, с учетом погрешности, соответствует нулевому значению.

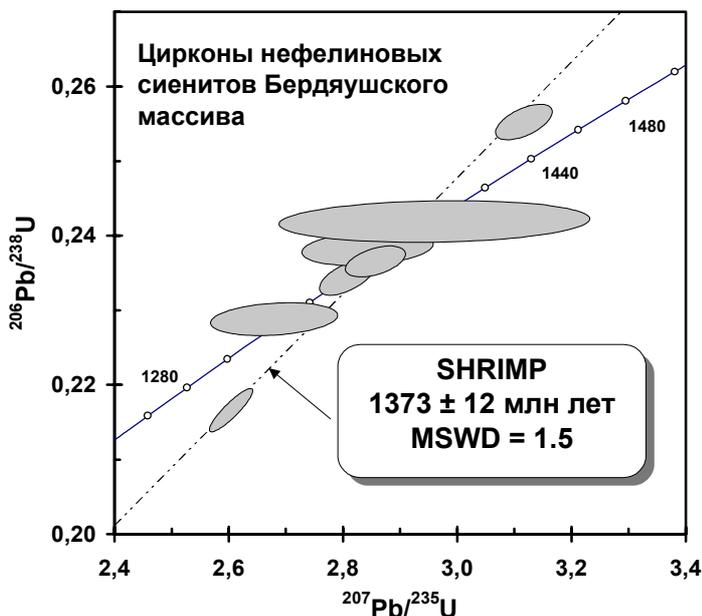


Рис. 5. SHRIMP U-Pb результаты по цирконам нефелиновых сиенитов Бердяушского массива.

Обсуждение результатов. Если, как уже говорилось выше, по гранитам-рапакиви, кварцевым сиенит диоритам вновь полученные [Ronkin, 1996, 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 практически изохронный U-Pb возраст 1373 ± 12 млн лет значительно древнее опубликованных в работе [Краснобаев, 1986]) «омоложенных» данных (две дискордантные фигуративные точки в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) с возрастными по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 1086 и 1302 млн лет), что требует какого-либо вразумительного объяснения. Первая, на наш взгляд, причина, как уже отмечалось выше, заключается в том, что из-за отсутствия в 80-е 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 (цитируем [Краснобаев, 1986] стр. 118) *«крупными кристаллами и их обломками, серого и розового цвета, со всеми стадиями перехода между разноокрашенными частями. Дробление и воздействие метасоматических растворов привели к частичному замещению розовой разновидности более поздней, серой метамиктной, с иной, не автосоматической, природой растворов, что допускает и значительный разрыв между разновидностями».* Типичные представители этих цирконов (проанализированных в ГЕОХИ Е.В. Бибиковой с коллегами) продемонстрированы на рис.6. Таким образом, резюмируя методологию подбора материала для проведенного U-Pb датирования в рамках работы [Крас-

нобаев, 1986]), можно констатировать, что в анализируемом материале наблюдается наложение, как минимум, двух усложняющих 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 (отношениям $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) и является главным недостатком анализа с использованием относительно больших исходных навесок цирконов.

Рассматривая же цифру 1373 ± 12 млн лет, полученную в настоящей работе, можно отметить, что близкие к обсуждаемому здесь (изохронному!) возрасту (с учетом погрешностей) (1368.4 ± 6.2 млн лет) были получены нами ранее [Sindern et al., 2003] с помощью U-Pb датирования индивидуальных зерен циркона, выделенных из нефелиновых сиенитов Бердяушского массива с применением смешанного трассера $^{205}\text{Pb}/^{233}\text{U}$, одновременного разложения нескольких кристаллов в тефлоновой капсуле и дальнейшего масс-спектрометрического анализа без хроматографического разделения Pb и U. Таким образом, двумя независимыми методами (SHRIMP и ID-TIMS) подтверждается более древнее возрастное положение нефелиновых сиенитов, нежели бытовавшее до настоящей работы. И наконец, с учетом данных по геохимии элементов примесей (см. статью Ронкина и др. «Основные геохимические характеристики гранитов-рапакиви ...» в данном сборнике), полученный возраст интерпретируется нами как время внутриплитного магматизма, приведшего, в свою очередь, к формированию гранитов-рапакиви и ассоциирующих нефелиновых сиенитов.

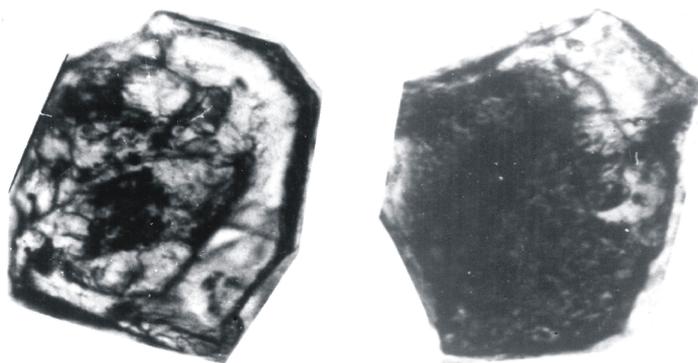


Рис. 6. Циркон из «миллиграммовой» популяции нефелиновых сиенитов Бердяушского массива, выделенный и проанализированный в рамках работы [Краснобаев, 1986].

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 (не более 30 мкм) в пределах изучаемых кристаллов цирконов для избежания смещения 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 ± 12 млн лет (MSWD=1.5), что значительно древнее опубликованных ранее цифр.

3. С учетом петрогенетических ограничений по элементам-примесям, возраст 1373 ± 12 млн лет интерпретируется нами как время внутриплитного магматизма, приведшего, в конечном итоге, к формированию нефелиновых сиенитов Бердяушского массива.

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. 148с.
- Black, L.P., Kamo, S.L.* TEMORA 1: a new zircon standard for U-Pb geochronology // Chemical Geology. 2003. 200. P. 155-170.
- Ireland T.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 Allugre C.J.* Uranium and lead isotopic dating with grain-by-grain zircon analysis: A study of complex geological history with a single rock // Earth Planet. Sci. Lett., 1976. 29. P. 357-366.
- Ludwig Kenneth R.* // Isoplot/Ex ver. 2.49. Berkeley Geochronology Center. Special Publication No. 1a. 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.P.Lepikhina* // 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.
- Schärer U. and Allugre C.J.* Uranium-lead system in fragments of single zircon grain // Nature. 1982. 295. P. 585-587.
- Sindern S., Ронкин Ю.Л., Kramm U. et al.* U-Pb датирование единичных кристаллов цирконов с применением трассера $^{205}\text{Pb}/^{233}\text{U}$: на примере нефелиновых сиенитов Бердяушского массива, Южный Урал // Материалы II Российской конференции по геохронологии. Санкт-Петербург, 2003. С. 461-465.
- Stacey, J.S. and Kramers, J.D.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model // Earth and Planetary Science Letters. 1975. 26. P. 207-221.
- Steiger R.H., Bickel R.A. and Meier M.* Conventional U-Pb dating of single fragments of zircon for petrogenetic studies of Phanerozoic granitoids // Earth Planet. Sci. Lett. 1993. 115. P. 197-209.
- Wendt J.I.* 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 I.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.