

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Ю. Л. Ронкин

Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, ronkin@r66.ru

U-Pb метод датирования, впервые реализованный на уранинитах более 100 лет назад [Boltwood, 1907], основан на явлении радиоактивного распада ^{235}U , ^{238}U в ^{207}Pb и ^{206}Pb , соответственно. Развитие возможностей метода связано с инновационными разработками многих талантливых ученых [Davis et. al., 2003], существенно расширившим потенциал U-Pb датирования в сравнении с первоначальными возможностями, благодаря чему появилась возможность изучения U-Pb систем минералов с более низкими содержаниями урана и тория, в частности, циркона, минерала подгруппы **островных силикатов** ZrSiO_4 , первое упоминание о датировании которого можно найти в работе [Keevil, 1939]. К настоящему времени этот минерал является абсолютным рекордсменом по количеству выполненных по нему возрастных определений в диапазоне от 1 млн. лет до более 4 млрд. лет, а U-Pb метод датирования цирконов представляет собой один из мощнейших инструментов изотопной геологии, позволяя успешно решать как фундаментальные, так и прикладные проблемы геологических наук.

Успешная реализация U-Pb датирования цирконов, в первом приближении, предполагает претворение следующих процедур: формулировка геологической проблемы адекватной возможностям метода; рациональный отбор соответствующего каменного материала; выделение цирконов; изучение минералогических особенностей кристаллов с помощью физических и химических методов; аналитические операции по получению изотопных распространенностей; обработка экспериментально полученной фактуры, и, наконец, интерпретация выявленных закономерностей. Причем, недоучет важности качественного претворения каждого звена в рассматриваемой цепи, в любом случае, может иметь фатальные последствия на конечные результаты.

Определение рациональной методологии U-Pb датирования цирконов, адекватной решаемой геологической проблеме, часто является трансцендентной задачей, решение которой возможно в результате совместных усилий специалистов как в области изотопной геологии, так и непосредственно геологов. Тем не менее, нередко можно наблюдать ситуации, когда методология применения той или иной модификации метода, проблема соответствия решаемой задачи и возможностей метода определяется исключительно либо геологом-инициатором исследования, или «изотопистом», твердо убежденных в своей интуитивной правоте. Такой подход не всегда дает положительные результаты, и нередко после проведенных исследований наступает разочарование в полученных результатах, поскольку часто выясняется, что выбранная, на свой страх и риск, зачинателем методология U-Pb датирования цирконов в принципе не могла обеспечить решение поставленной задачи изначально.

Рациональный отбор соответствующего каменного материала, исходя из решаемой задачи, его локализация и взаимоотношения со структурными и вещественными составляющими изучаемого объекта, размеры и объем образцов также представляет известную проблему, тесно связанную с условиями и масштабами изотопного уравнивания U-Pb изотопной системы. В зависимости от цели геохронологического исследования и характера изучаемого объекта используются различные способы опробования. Наиболее употребительны: отбор образцов породы (массой, величина которой находится в зависимости от «выхода» целевых цирконов после их сепарации, см. ниже) из одного и того же обнажения на расстояниях, измеряемых десятками сантиметров и метрами (такое опробование, которое можно назвать «гнездовым», часто проводится в нескольких местах); отбор образцов породы в виде серии соприкасающихся друг с другом пластин (так называемый «метод тонких пластин») толщиной несколько

миллиметров или сантиметров, при этом обычно стараются выбрать породу с хорошо выраженной «пластино-образной» неоднородностью на породном уровне [Ронкин и др., 2003]; отбор образцов породы на относительно большом расстоянии друг от друга – так называемое «региональное» опробование.

Для «типично цирконсодержащих» пород традиционная схема извлечения цирконов в комплексе с тяжелыми минералами предусматривает дробление исходных проб путем разноразмерного просеивания, применения концентрационного стола, изодинамического магнитного сепаратора и тяжелых жидкостей. Окончательная выборка целевых цирконов обычно осуществляется вручную, под биноклем. Главной заботой на этом этапе является исключение заражения ксеногенным материалом. Однако в случае выделения цирконов из пород мафит-ультрамафитового и экзотического составов, характеризующихся следовыми концентрациями U и Pb порядка $n \cdot 0.1 - n \cdot 10$ ppm, данная процедура представляет вполне самостоятельную задачу. Решение этой проблемы может быть организовано на базе так называемой «ppm (parts per million) – минералогии», технологии высокочувствительных минералогических работ, предполагающей целый ряд специфических процедур [Кнауф, 1996]. В любом случае, рациональный подход может потребовать предварительного отбора определенной массы пробы для оценки результирующего «выхода» цирконов. Изучение минералогических особенностей цирконов с помощью оптических (в проходящем и отраженном варианте) разнообразных спектроскопических методов (SEM/EDS, BSE, CL, и прочие [Nasdala et al., 2003]) является обязательным элементом на пути современного U-Pb датирования цирконов, с целью выяснения масштабов и степени геохимической гетерогенности, наличия включений, зональности, постмагматических и метаморфических изменений, унаследованных реликтов и соответствующей реконструкции эволюции и логической интерпретации U-Pb изотопной систематики конкретных кристаллов [Poller et al., 1997]. Данная процедура максимально актуальна при изучении U-Pb систематики SIMS методами, а также аттестации природных и синтетических стандартов цирконов для U-Pb датирования.

Аналитические операции по получению изотопных параметров U-Pb системы цирконов в настоящее время осуществляются преимущественно двумя способами. Первым является классический метод изотопного разбавления (ID), предполагающий использование трассера (spike-имеющего искусственно обогащенный относительно природного, изотопный состав U-Pb: $^{205}\text{Pb} + ^{233}\text{U}$, $^{233}\text{U} + ^{236}\text{U}$, $^{205}\text{Pb} + ^{235}\text{U} + ^{233}\text{U}$, $^{202}\text{Pb} + ^{205}\text{Pb} + ^{235}\text{U} + ^{233}\text{U}$) и последующего масс-спектрометрического анализа U-Pb изотопного состава смесей исследуемого материала с трассером при помощи прецизионных твердофазных анализаторов с твердофазной ионизацией (TIMS) и/или мультколлекторными MC-ICP/MS. Альтернативными являются локальные, «in situ» методы (позволяющие анализировать U-Pb изотопный состав нанограммовых, и менее, объемов вещества) основанные на масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) [Ireland & Williams, 2003] и лазерной абляции LA-ICP/MS [Kosler & Sylvester, 2003]. Поскольку, принципы рассматриваемых U-Pb аналитических приемов 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 как единичных кристаллов циркона, так и их фрагментов. Однако претворение этих методик весьма трудоемко и дорогостояще, предполагая наличие целого комплекса специального оборудования, чистых помещений, стандартов, реагентов и т.д. Известные методологические трудности вызывает U-Pb ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS датирование полифазных цирконов, требующих реализации физической [Krogh, 1982] и химической сепарации [Mattinson, 2005]. Преимуществом SIMS инструментов являются экспрессность и возможность U-Pb датирования нано-объемов в пределах одного кристалла, что позволяет документировать эволюцию сложно организованных цирконов во времени. Основным недостатком метода – значительная в сравнении с ID-TIMS или ID-MC-ICP/MS, на порядок и более, погрешность, маскирующая возможные потери свинца (и/или урана), что в конечном итоге может спровоцировать появление артефактов при вычислении «сближенных» U-Pb возрастов (приводя к выделению «этапов» магматизма,

метаморфизма, ложным представлениям о длительной «эволюции» изучаемых геологических объектов и т.д. и т.п).

И наконец, завершающими этапами являются построение графиков с конкордией (в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) и возрастные вычисления (обычно производимые с помощью программы Isoplot/Ex [Ludwig, 2008], имеющей соответствующие утилиты для обработки экспериментально полученных как U-Pb систематики, так и изотопных данных иных радиогенных систем), а также соответствующая геологической обстановке, событийная интерпретация цирконовых U-Pb возрастов, характеризующихся обширной концептуальной номенклатурой [Rollinson, 1993; и многие др.]: cooling age, metamorphic age, crystallization age, magmatic age, crust formation age, cratonization age, crust residence age, provenance age, model age и т.д.

Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН № 23 «Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов», а также в рамках интеграционной программы УрО РАН «Состав, структура и физика радиационно-термических эффектов в фосфатных и силикатных минералах и стеклах», при поддержке грантов РФФИ № 09-05-00513 и 10-05-00326.

Литература

- Кнауф В. В.* К метрологическому обеспечению минералогических работ // ЗВМО. 1996. Вып. СХХV, № 6. С. 109–113.
- Ронкин Ю. Л., Sindern S., Kratt U., Ленных В. И., Маслов А. В., Лепихина О. П.* Оценка степени гомогенизации изотопного состава Sr-Nd высокометаморфизованных пород методом «тонких пластин» на примере Тараташского комплекса, Южный Урал // Материалы II Российской конференции по геохронологии. СПб. 2003. С. 420–424.
- Boltwood B. B.* On the ultimate disintegration products of the radioactive elements. Part II. The disintegration products of uranium // Am. J. Sci. 1907. 23. P. 77–88.
- Davis D. W., Williams I. S. and Krogh T. E.* Historical development of zircon geochronology. In: J. M. Hanchar and P. W. O. Hoskin, Editors, Zircon. Reviews in Mineralogy. Vol. 53. 2003. С. 145–181.
- Ireland T. R. and Williams I. S.* Considerations in Zircon Geochronology by SIMS. In: J. M. Hanchar and P. W. O. Hoskin, Editors, Zircon. Reviews in Mineralogy. Vol. 53. 2003. P. 215–241.
- Keevil N. B.* The calculation of geologic age // Am. J. Sci. 1939. 237. P. 195–214.
- Kosler J. and Sylvester P. J.* Present trends and the future of zircon in geochronology: laser ablation ICPMS. In: J. M. Hanchar and P. W. O. Hoskin, Editors, Zircon. Reviews in Mineralogy. Vol. 53. 2003. P. 244–275.
- 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. 46. P. 637–649.
- Ludwig K. R.* // Isoplot / Ex. ver. 3.6. Berkeley Geochronology Center. Special Publication No. 4, 2008. 77 p.
- Mattinson J. M.* Zircon U-Pb chemical abrasion («CA-TIMS») method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages // Chemical Geology, 2005. 220(1–2), 47–66.
- Nasdala, L., Zhang M., Kempe U., Panczer G., Gaft M., Andrut M., Plotze M.* Spectroscopic methods applied to zircon. In: Zircon (Hanchar J. M. and Hoskin P. W. O., eds.). Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53, Mineralogical Society of America. P. 427–467.
- Poller U., Liebetau V., Todt W.* U-Pb single-zircon dating under cathodoluminescence control (CLC-method): application to polymetamorphic orthogneisses // Chem. Geol. 1997. V. 139. P. 287–297.
- Rollinson H.* Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation: Longman Scientific and Technical, 1993. 352 p.