

**О ХИМИЧЕСКОМ ДАТИРОВАНИИ
МИНЕРАЛОВ-КОНЦЕНТРАТОРОВ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Вотьяков С.Л., Хиллер В.В., Шапова Ю.В., Поротников А.В., Вохмякова В.С.

Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, votyakov@igg.uran.ru

Классический метод химического датирования U-Th-Pb-минералов получил новый импульс в развитии в связи с усовершенствованием микронзондовой аппаратуры и разработкой новых подходов к численному обсчету данных. Его популярность обусловлена простотой, доступностью и низкой себестоимостью единичного анализа. Однако и в настоящее время остаются нерешенными три основные группы проблем: (1) связанные с оценкой конкордантности данных и выбором подхода для их обработки (из единичного анализа в точке [2]; из модельной изохроны [4]; из расчёта U/Pb и Th/Pb-возрастов в трёхмерном ThO₂-PbO-UO₂-пространстве [3] или на двумерной U/Pb-Th/Pb-диаграмме [1]); (2) связанные с аппаратурной реализацией метода, пробоподготовкой и выбором стандартов; (3) связанные с интерпретацией датировок по минералам, в частности, с привлечением независимых кристаллохимических данных и анализом поведения изотопной U-Th-Pb-системы.

Цель работы – повышение достоверности и объективности анализа с возможностью отбраковки недостоверных результатов при датировках минералов (на примере проб из ряда геологических объектов Урала), при расчете «возраста» из модельных данных для U-Th-Pb-системы в рамках различных математических схем их обработки.

Результаты. Выполнено моделирование изохронных данных для U-Th-Pb-системы с возрастом (T) и его «восстановление» (T_{расч}), следуя [2] и [4], при варьировании характеристик системы: значения T, начального содержания и соотношения UO₂^{нач}, ThO₂^{нач} (рассмотрены случаи практически «моноэлементной» высокоурановой или высокоторийевой системы UO₂^{нач}/ThO₂^{нач} ≪ 1 или ThO₂^{нач}/UO₂^{нач} ≪ 1), значения СКВО UO₂^{нач}, ThO₂^{нач}, содержания нерадиогенного PbO^{нач} и потерь радиогенного Pb, погрешности ΔU/U, ΔTh/Th, ΔPb/Pb, количества измерений N и др. При равенстве Th/Pb и U/Pb-возрастов конечные значения ThO₂^{кон}, UO₂^{кон}, PbO^{кон} для системы с возрастом T рассчитывались как: Th^{кон} = Th^{нач} * exp(-λ₂₃₂ * T); U^{кон} = ²³⁵U^{кон} + ²³⁸U^{кон} = ²³⁵U^{нач} * exp(-λ₂₃₅ * T) + ²³⁸U^{нач} * exp(-λ₂₃₈ * T); Pb^{кон} = Pb_{нерад} + ²⁰⁸Pb + ²⁰⁷Pb + ²⁰⁶Pb = Pb_{нерад} + ²³²Th {exp(λ₂₃₂ * T) - 1} + ²³⁵U {exp(λ₂₃₅ * T) - 1} + ²³⁸U {exp(λ₂₃₈ * T) - 1}, где λ_{232, 235, 238} – константы радиоактивного распада изотопов, T – возраст системы. Моделировалась некая статистическая реализация конкордантных данных; дискордантные данные моделировались либо суперпозицией ряда конкордантных (случай смешения микронзондовых результатов по разновозрастным зонам кристаллов), либо введением потерь радиогенного Pb, в том числе непропорциональных для изотопов ²⁰⁸Pb и ²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb (имитация их диффузии из кристалла или его зон при температурах выше закрытия U-Pb или Th-Pb-подсистемы). Случай добавки или потери материнских изотопов U и Th не рассматривался. Для каждой статистической реализации значений ThO₂^{кон}, UO₂^{кон}, PbO^{кон}, имитирующей единичное микронзондовое измерение в точке минерала, рассчитывался возраст по Montel. Для выборки из N = 5-100 статистических реализаций значений ThO₂^{кон}, UO₂^{кон}, PbO^{кон} проводилось построение и анализ модельной изохроны в координатах ThO₂*-PbO (для высокоторийевой системы) (или UO₂*-PbO для высокоурановой). Здесь ThO₂* = ThO₂ + «эквивалент UO₂» (для UO₂* – наоборот); «эквивалент UO₂» при допущении равенства U/Pb и Th/Pb-возрастов есть некоторое содержание U, пересчитанное в эквивалентное содержание Th, которое могло бы «произвести» то же количество Pb за время жизни системы T: ThO₂* = ThO₂ + UO₂ (W_{Th}/W_{U}) [{exp λ₂₃₅ T + 137,88 * exp λ₂₃₈ T} / {138,88 - 1} / {exp λ₂₃₂ T - 1}]; UO₂* = UO₂ + 138,88 * ThO₂ W_U {exp λ₂₃₂ T - 1} / UO₂ = UO₂ + 138,88 * ThO₂ W_U {exp λ₂₃₂ T - 1} / [W_{Th} {137,88 * exp λ₂₃₈ T + exp λ₂₃₅ T - 138,88}], здесь W – молекулярный вес оксидов U, Th, Pb. По углу наклона изохроны на диаграмме ThO₂*-PbO оценивалось значение Th/Pb-возраста системы с одновременной оценкой содержания нерадиогенного Pb. Получаемые при этом изохронные данные (возраст по Suzuki) моделируют результаты анализа в пределах различных областей одного гетерогенного кристалла и (или) различных гомогенных кристаллов одного (близкого) возраста. На основе анализа модельных данных для U-Th-Pb-системы рассмотрены вопросы повышения воспроизводимости, объективности анализа с возможностью отбраковки недостоверных резуль-}

татов, сформулированы условия (минимальное количество измерений, содержание PbO^{nat} , погрешность определения Pb и др.), при которых могут быть получены корректные возрастные определения высокоурановых (высокториевых) минералов. На микроанализаторе SX 100 выполнен анализ и элементное картирование U-Th-минералов из коллекции А.А. Краснобаева, В.А. и В.И. Поповых, Т.А. Осиповой, К.С. Иванова, В.В. Мурзина, Ю.В. Ерохина; исследованы монациты гранитных пегматитов Ильменогорского массива и ураниниты гранитоидов Первомайского; ураниниты и ториты гранитоидов фундамента Западной Сибири, кварц-сульфидных жил Пышминско-Ключевского месторождения; торианиты Карабашского гипербазитового массива. Исследования проведены как для минералов в полированных шлифах, так и для микрокристаллов в шашках на пяти волновых спектрометрах при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе поглощённых электронов на цилиндре Фарадея 250 нА; угол отбора рентгеновского излучения волновыми спектрометрами 40° , диаметр пучка на образце 2 мкм. При проведении исследований варьировалось время измерения интенсивностей M_β -линии урана, M_α -линий тория и свинца (при этом время набора импульсов на пике в два раза больше времени измерения интенсивностей фона с каждой стороны от пика). Время экспозиции аналитической линии – 5-600 с; верхний предел времени ограничен процессом выгорания образца. Выполнены датировки по Montel и Suzuki; показано, что их погрешность составляет от 1,5-2,7 (для уранинитов) до 4,5-6,5% (высокториевых монацитов); рассмотрено влияние времени накопления сигнала при микронзондовых анализах проб (величины $\Delta U/U$, $\Delta Th/Th$, $\Delta Pb/Pb$) на погрешность датировок. Рассмотрены кристаллохимические подходы к анализу конкордантности данных, основанные на модельных представлениях об образовании твердых растворов в системе монацит-хуттонит-брабантит (при изоморфизме $Th(U)+Si \rightarrow P3Э+P$ и $Th(U)+Ca \rightarrow P3Э+P (Ca+Si)$).

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

1. Cocherie A., Albarede F. An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite // *Geoch. Cosmoch. Acta*. 2001. V. 65. № 24. P. 4509-4522.
2. Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet Ch., Provost A. Electron microprobe dating of monazite // *Chem. Geol.* 1996. V. 131. P. 37-53.
3. Rhede D., Wendt I., Furrer H.J. A three-dimensional method for calculating independent chemical U/Pb- and Th/Pb-ages of accessory minerals // *Chem. Geol.* 1996. 30. P. 247-253.
4. Suzuki K., Adachi M., Tanaka T. Middle Precambrian provenance of Jurassic sandstone in the Mino Terrane, central Japan: Th-U-total Pb evidence from an electron microprobe monazite study // *Sed. Geol.* 1991. V. 75. P. 141-147.