

О ДОСТОВЕРНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ДАННЫХ ПРИ ХИМИЧЕСКОМ ДАТИРОВАНИИ МИНЕРАЛОВ-КОНЦЕНТРАТОРОВ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

Классический метод химического датирования U-Th-Pb-минералов получил новый импульс в развитии в связи с усовершенствованием микрозондовой 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 [Montel et al., 1996]; из модельной изохроны [Suzuki et al., 1991]; из расчёта U/Pb и Th/Pb-возрастов в трёхмерном ThO₂-PbO-UO₂-пространстве [Rhede et al., 1996] или на двумерной U/Pb-Th/Pb-диаграмме [Cocherie, Albarede, 2001]); (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 [Montel et al., 1996] и [Suzuki et al., 1991], при варьировании характеристик системы: значения T (рис. 1а), 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} (рис. 1 в, г) 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:

$$\begin{aligned} \text{Th}^{\text{кон}} &= \text{Th}^{\text{нач}} \cdot \exp(-\lambda_{232} \cdot T), \\ \text{U}^{\text{кон}} &= {}^{235}\text{U}^{\text{кон}} + {}^{238}\text{U}^{\text{кон}} = {}^{235}\text{U}^{\text{нач}} \cdot \exp(-\lambda_{235} \cdot T) + {}^{238}\text{U}^{\text{нач}} \cdot \exp(-\lambda_{238} \cdot T), \\ \text{Pb}^{\text{кон}} &= \text{Pb}_{\text{нерад}} + {}^{208}\text{Pb} + {}^{207}\text{Pb} + {}^{206}\text{Pb} = \text{Pb}_{\text{нерад}} + {}^{232}\text{Th} \{ \exp(\lambda_{232} \cdot T) - 1 \} + {}^{235}\text{U} \{ \exp(\lambda_{235} \cdot T) - 1 \} + \\ &\quad + {}^{238}\text{U} \{ \exp(\lambda_{238} \cdot T) - 1 \}, \end{aligned}$$

где λ_{232} , λ_{235} , λ_{238} – константы радиоактивного распада изотопов, T – возраст системы. Моделировалась некая статистическая реализация конкордантных данных (рис. 1а); дискордантные данные моделировались либо суперпозицией ряда конкордантных (случай смешения микрозондовых 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 микрозондовое измерение в точке минерала, рассчитывался возраст по Montel (рис. 1б). Для выборки из N = 5–100 статистических реализаций значений ThO₂^{кон}, UO₂^{кон}, PbO^{кон} проводилось построение и анализ

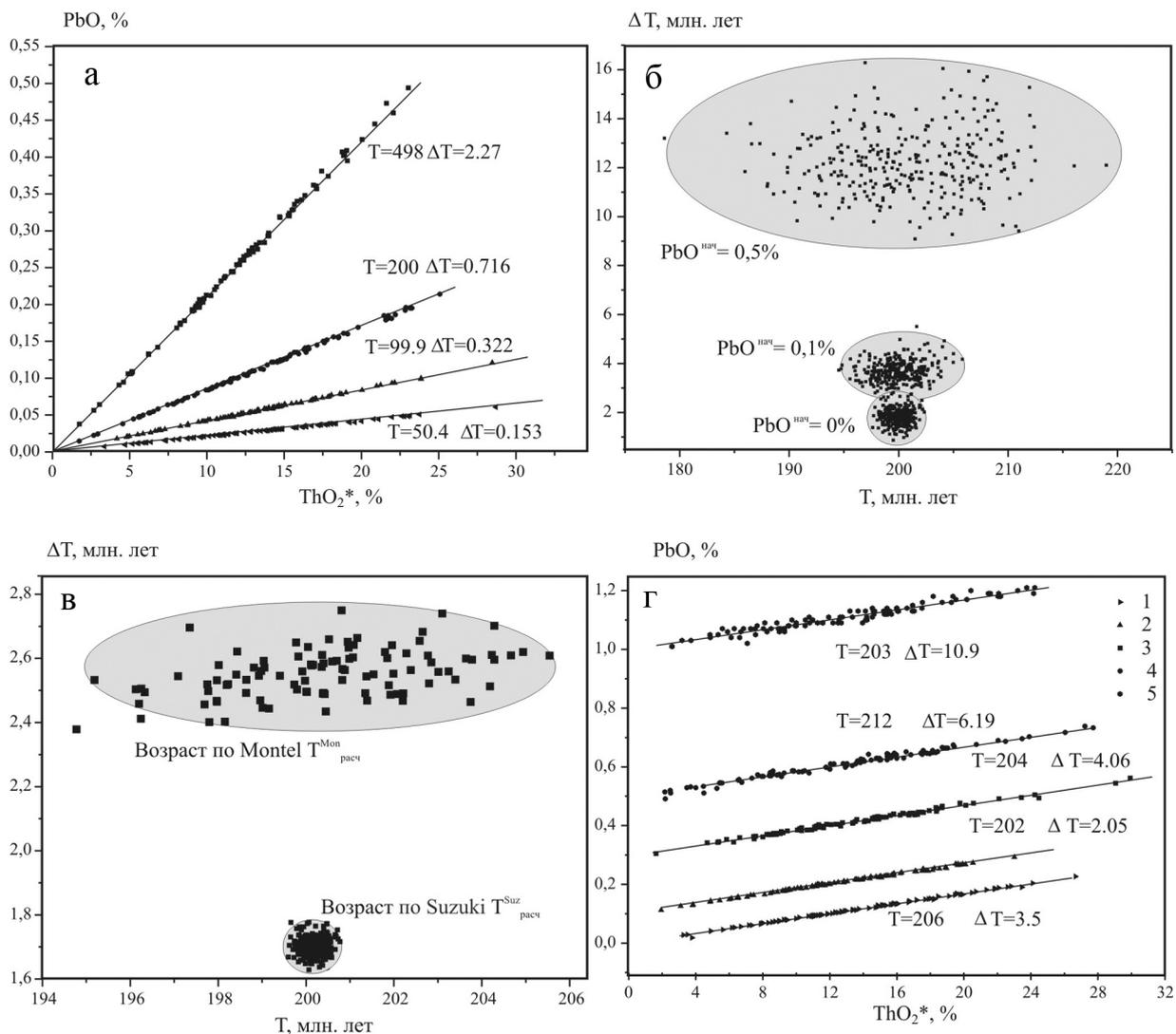


Рис. 1. Модельные данные для высокотермической системы различного возраста ($T = 50, 100, 200$ и 500 млн лет; число измерений $N = 100$) (а). Сопоставление расчетных возрастов для 50 статистических реализаций системы с $T = 50$ млн лет по Montel и по Suzuki (б). Модельные данные для системы с различным содержанием нерадиогенного $PbO^{нач}$ (1 – 0; 2 – 0.1; 3 – 0.3; 4 – 0.5; 5 – 1.0 %) (в). Значения возрастов по Suzuki для 50 статистических реализаций изохрон с $T = 200$ млн лет при $PbO^{нач} = 0; 0.1$ и 0.5 % (г). $UO_2^{нач} = 1, ThO_2^{нач} = 10$ %; СКВО $UO_2^{нач} = ThO_2^{нач} = 30$ %; $\Delta U/U = \Delta Th/Th = \Delta Pb/Pb = 1$ %.

модельной изохроны в координатах $ThO_2^* - PbO$ (для высокотермической системы (рис. 1б) (или $UO_2^* - PbO$ для высокоурановой). Здесь $ThO_2^* = ThO_2 + \text{«эквивалент } UO_2\text{»}$ (для $UO_2^* - \text{наоборот}$); «эквивалент UO_2 » 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 :

$$ThO_2^* = ThO_2 + UO_2 (W_{Th}/W_U) [\{ \exp \lambda_{235} T + 137.88 * \exp \lambda_{238} T \} / 138.88 - 1] / \{ \exp \lambda_{232} T - 1 \},$$

$$UO_2^* = UO_2 + 138.88 * ThO_2 W_U \{ \exp \lambda_{232} T - 1 \} / UO_2 = UO_2 + 138.88 ThO_2 W_U \{ \exp \lambda_{232} T - 1 \} / [W_{Th} \{ 137.88 * \exp \lambda_{238} T + \exp \lambda_{235} T - 138.88 \}],$$

здесь W – молекулярный вес оксидов U, Th, Pb ($W_{Th} = 264, W_U = 270, W_{Pb} = 224$). По углу наклона изохроны на диаграмме $ThO_2^* - PbO$ оценивалось значение Th/Pb -возраста системы с одновременной оценкой содержания нерадиогенного Pb .

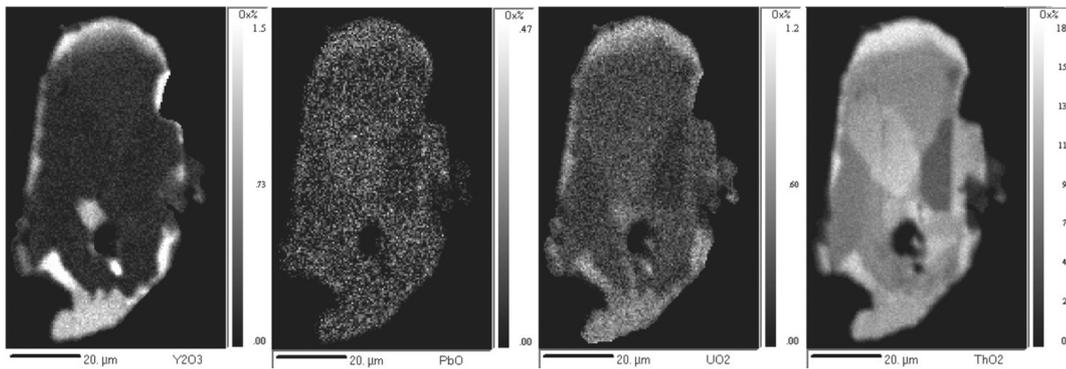


Рис. 2. Типичное распределение элементов Y, Pb, U и Th в зерне монацита.

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 результатов, сформулированы условия (минимальное количество измерений, содержание $PbO^{нач}$, погрешность определения Pb и др.), при которых могут быть получены корректные возрастные определения высокоурановых (высокоториевых) минералов.

На микроанализаторе SX 100 выполнен анализ и элементное картирование U–Th-минералов (рис. 2) 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; ториниты 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 % (высокоториевых монацитов); рассмотрено влияние времени накопления сигнала при микрозондовых 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

Cocherie A., Albarede F. An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite // *Geoch.Cosmoch. Acta.* 2001. V. 65. N. 24. P. 4509–4522.

Montel J-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet Ch., Provost A. Electron microprobe dating of monazite // *Chem. Geol.* 1996.V. 131. P. 37–53.

Rhede D., Wendt I., Forster 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.

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.