

# ХИМИЧЕСКОЕ МИКРОЗОНДОВОЕ ДАТИРОВАНИЕ U-Th-СОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

С. Л. Вотяков, В. В. Хиллер, Ю. В. Щапова, А. В. Поротников

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

Абсолютная геохронология – одна из основополагающих дисциплин в науках о Земле. В последние десятилетия наиболее активно развивается локальная или микрогеохронология, в частности, метод химического (неизотопного) микрозондового датирования U-Th-минералов, практически единственный для оценки возрастной эволюции уранинита, монацита и других минералов с высокими содержаниями U и Th, достаточно часто гетерогенных по возрасту. Датировки последних методами изотопной микрогеохронологии в масс-спектрометрическом варианте с лазерной абляцией или ионным зондированием проб встречаются со значительными сложностями. Большое число зарубежных публикаций посвящено применению химической методики для датирования различных геологических объектов [Montel et al., 1996; Rhede et al., 1996; Cocherie, Albarede, 2001; Dahl, 2005; Suzuki, Kato, 2008]. В России в этой области известны лишь отдельные публикации А. Н. Конилова, И. М. Романенко, Д. Б. Петрова, Е. Х. Кориш, С. М. Пилюгина, А. А. Мухановой, К. А. Савко, С. Л. Вотякова, В. В. Хиллер, Ю. В. Щаповой. Несмотря на широкий зарубежный опыт использования химического метода и сегодня в его рамках остается нерешенным ряд вопросов, касающихся оптимизации условий проведения анализа, выбора схемы обработки данных, поиска критериев замкнутости U-Th-Pb-системы минералов (кристаллохимических индикаторов их вторичных преобразований и возрастной микрогетерогенности зерен).

**Цель работы** – сопоставление и развитие подходов для химического датирования минералов на основе вычислительного эксперимента по моделированию эволюции во времени их U-Th-Pb-системы, исследование особенностей состава и химическое датирование монацита, уранинита и других U-Th-минералов из ряда уральских и сибирских объектов.

**Датирование модельной системы.** На первом этапе моделирования проводилось решение «прямой» задачи – рассчитывалась временная эволюция системы, для чего принимались значения начальных содержаний  $U_n$ ,  $Th_n$  и их дисперсии, имитирующей неоднородность ее состава; рассматривалось  $N$  статистических реализаций системы с последующим расчетом конечных содержаний  $Pb_k$ ,  $U_k$ ,  $Th_k$  в предположении, что ее модельный возраст равен  $T_m$ , и присутствует нерадиоогенный  $Pb_n$ :  $Pb_k = Pb_n + \alpha [^{232}Th(e^{\lambda_{232t}} - 1) + ^{235}U(e^{\lambda_{235t}} - 1) + ^{238}U(e^{\lambda_{238t}} - 1)]$ ,  $Th_k = ^{232}Th_n e^{-\lambda_{232t}}$ ,  $U_k = ^{235}U_n e^{-\lambda_{235t}} + ^{238}U_n e^{-\lambda_{238t}}$ , где  $t = T_m$ ,  $\lambda$  – константы распада материнских изотопов U (Th) и некоторый параметр  $\alpha < 1$  характеризует эпизодические диффузионные потери радиоогенного Pb. На втором этапе проводилось решение «обратной» задачи – восстановление возраста системы  $T_p \pm \Delta T_p$  по значениям  $Pb_k$ ,  $U_k$ ,  $Th_k$  в условиях наличия некоторой «экспериментальной» погрешности определения содержаний  $\Delta Th/Th$ ,  $\Delta U/U$ ,  $\Delta Pb/Pb = 1-10\%$ .

Возраст  $T_p$ , его погрешность  $\pm \Delta T_p$  и СКВО рассчитывались с использованием модифицированной программы Isoplot 3.66 и оригинальной программы [Вотяков и др., 2010] в рамках четырех подходов: из единичного определения содержания  $U_k$ ,  $Th_k$  и  $Pb_k$  (далее «точечные» значения U-Th-Pb-возраста, рис. 1а), следуя [Montel et al., 1996]; из Th\*-Pb-изохроны для высокотермических минералов (или U\*-Pb – для высокоурановых) с оценкой нерадиоогенного  $Pb_n$  (рис. 2а), следуя [Suzuki, Kato, 2008]. Здесь  $Th^* = (Th + U^{ЭКВ})$ , где  $U^{ЭКВ}$  – содержание U, пересчитанное в эквивалентное содержание Th, способное произвести то же количество Pb за время жизни системы; из Th/Pb-U/Pb-изохроны,

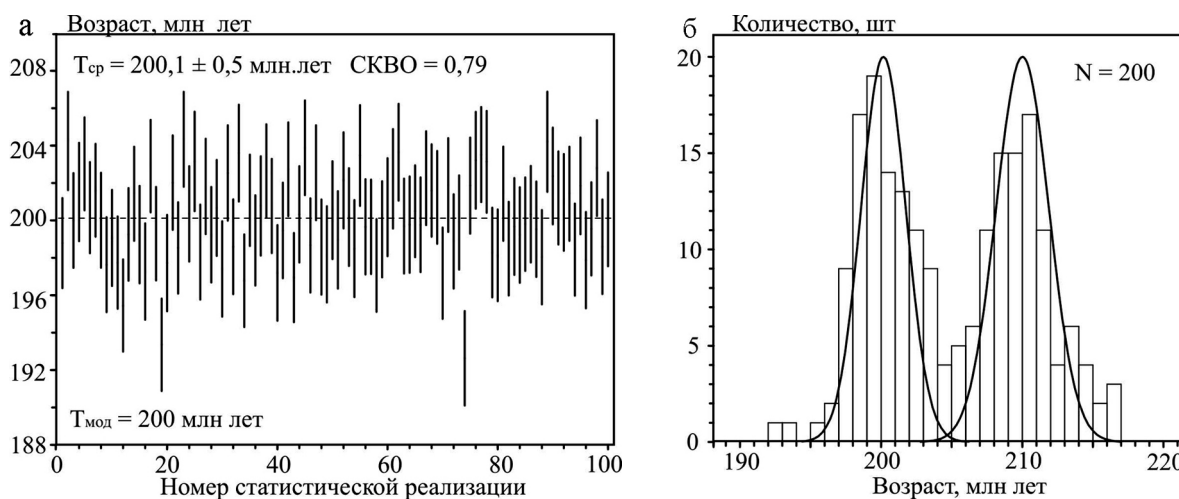


Рис. 1. Вариации точечных значений возраста  $T_p$  для высокотермической гомогенной системы с  $T_m = 200$  млн лет (а) и гистограмма распределения  $T_p$  для высокотермической гетерогенной системы с  $T_m = 200+210$  млн лет (б).

следуя [Cocherie, Albarede, 2001] с оценкой изохронного возраста по  $X_{cp}$ ,  $Y_{cp}$  – координатам средневзвешенной точки на линии регрессии по выборке из  $N$  точек (рис. 2б); из Th-Pb-U-изохронной плоскости с оценкой нерадиогенного  $Pb_n$  (рис. 2в), следуя [Rhede et al., 1996]). Проанализировано влияние вариаций в системе нерадиогенного  $Pb_n$  и диффузионных потерь радиогенного Pb (значения параметра  $\alpha$ ) на величину  $\delta = (T_p - T_m) / T_m$ , фиксирующую различие модельного и расчетного возраста системы. Предложен алгоритм датирования системы, гетерогенной по возрасту, включающий анализ гистограммы распределения единичных определений ее возраста с выделением экстремумов (рис. 1б) и кластеризацией совокупностей данных, относящихся к разновозрастным подсистемам, с их последующей изохронной датировкой. Выполнен анализ влияния параметров модельной системы (ее состава и дисперсии содержаний U и Th, модельного возраста  $T_m$  в интервале от 100 до 2000 млн лет, статистики выборки данных, погрешности определения содержаний, «смещения» нескольких разновозрастных подсистем, наличия нерадиогенного  $Pb_n$  и диффузионных потерь радиогенного) на значение погрешности определения возраста  $\pm \Delta T_p$  и величину СКВО.

**Датирование природных минералов.** Выполнены микрозондовые исследования особенностей состава (микроанализатор SX 100), проведено элементное картирование (рис. 3а) и химическое датирование коллекции U-Th-минералов из ряда уральских и сибирских объектов: монацита из пегматитов Блюмовской копи Ильменогорского щелочного и Адуйского гранитного массива, из гнейсов и гранулитов Тараташского комплекса (Урал), из гнейсов Заангарья Енисейского кряжа; монацита и уранинита из гранитоидов Первомайского и Джабыкского массива (Урал); уранинита, торита и монацита из гранитоидов фундамента Западной Сибири и Ямала; уранинита из жил Пышминско-Ключевского месторождения; торитана из Карабашского гипербазитового массива; уранинита и коффинита из пегматитов Липовского жильного поля (Урал). Проанализировано 25 проб (более ста зёрен) монацита, 4 пробы (20 зёрен) уранинита, 4 пробы торита, тоританит и коффинит; расчет возраста проводился для  $N$  точек зерна (зерен) минералов ( $N = 10-100$ ) с использованием четырех описанных выше подходов. Показано, что гистограммы распределения точечных U-Th-Pb-возрастов в большинстве исследованных минералов имеют вид функций, близких к гауссовой, с одним максимумом, по которому оценено его средне-взвешенное значение (рис. 3б); сделан вывод, что зерна гомогенны по возрасту, и их Th-U-Pb-система закрыта. Для подавляющего большинства точек в монацитах это согласуется с «химическими» представлениями: установлено,

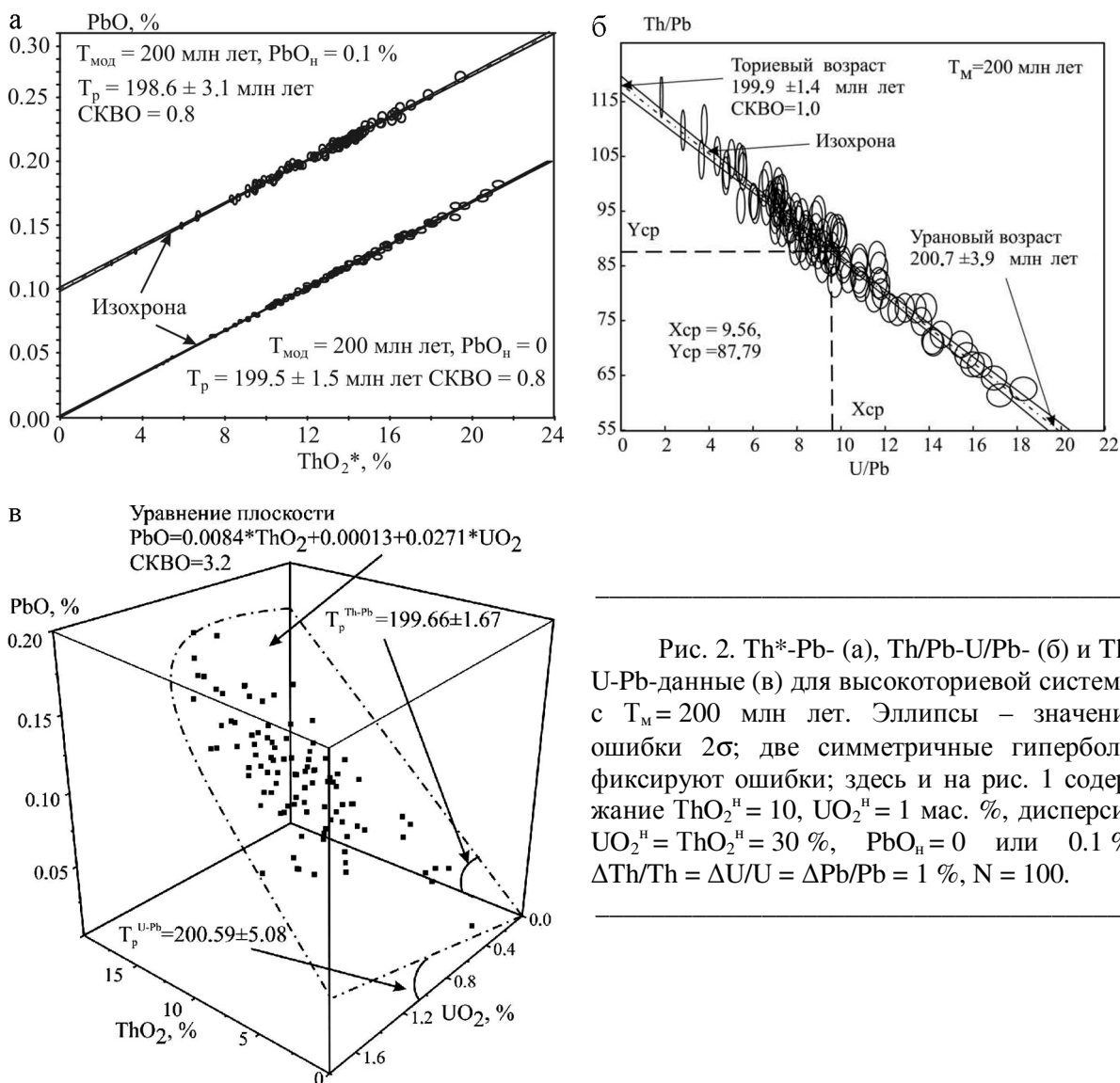


Рис. 2. Th\*-Pb- (а), Th/Pb-U/Pb- (б) и Th-U-Pb-данные (в) для высокоториевой системы с  $T_M = 200$  млн лет. Эллипсы – значения ошибки  $2\sigma$ ; две симметричные гиперболы фиксируют ошибки; здесь и на рис. 1 содержание  $ThO_2^H = 10$ ,  $UO_2^H = 1$  мас. %, дисперсия  $UO_2^H = ThO_2^H = 30$  %,  $PbO_{\text{н}} = 0$  или  $0.1$  %,  $\Delta Th/Th = \Delta U/U = \Delta Pb/Pb = 1$  %,  $N = 100$ .

что для них параметр  $\beta = (Si+Ca)/(Th+U+Pb)$ , характеризующий зарядовую компенсацию примесей  $Th^{4+}$  и  $U^{4+}$  при хаттонитовом и чералитовом изоморфизме, близок к 1, т.е. следуя [Suzuki, Kato, 2008], Th-U-Pb-систему минерала можно предполагать закрытой. Рассмотрены перспективы использования КР-микросонда и других локальных методик для подобных оценок. На Th\*-Pb-, Th/Pb-U/Pb-диаграммах данные, полученные практически для всех точек проб, удовлетворительно ложатся на изохроны (рис. 3в); содержание нерадиогенного  $Pb_{\text{н}}$ , рассчитанное по пересечению Th\*-Pb-изохроны с PbO-осью, сопоставимо с пределами его обнаружения в минералах. Рассмотрены возможности изохронной датировки системы из двух сосуществующих уранинита и монацита; показана корректность построения биминеральных изохрон на двух типах диаграмм (Th\*-Pb и Th/Pb-U/Pb) при условии близости средне-взвешенных точечных значений их возрастов; установлено, что изохронные расчеты дают согласующиеся значения возрастов, при этом погрешности их определения  $\pm \Delta T_p$  и значения СКВО существенно снижаются по сравнению с таковыми для мономинеральных изохрон.

Показано, что для большинства исследованных геологических объектов химические датировки в интервале от 240 до 2000 млн лет, полученные для U-Th-минералов в рамках различных методических подходов, в целом, удовлетворительно согласуются как между собой, так и с изотопными данными по сосуществующим минералам-геохронометрам.

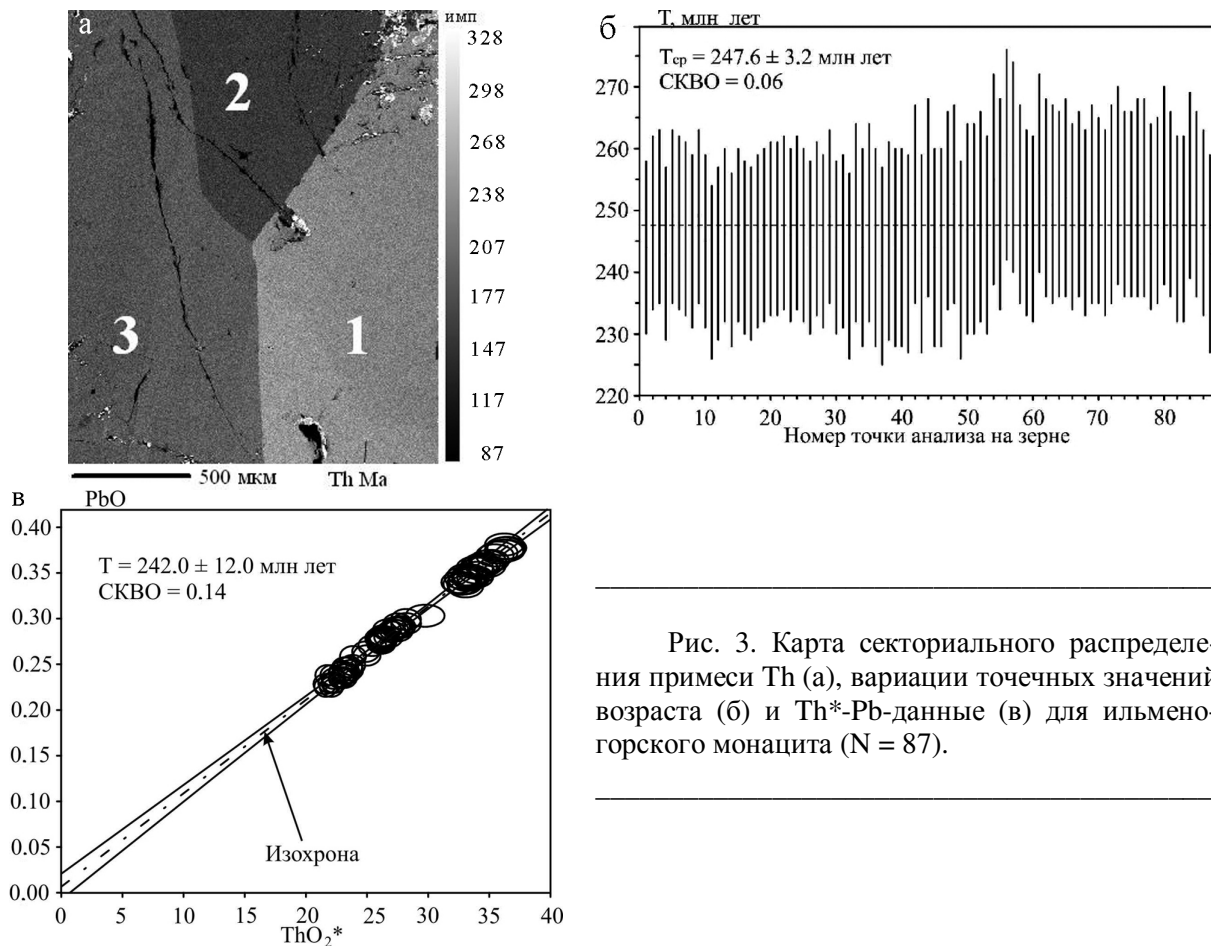


Рис. 3. Карта секториального распределения примеси Th (а), вариации точечных значений возраста (б) и Th\*-Pb-данные (в) для ильменитового монацита (N = 87).

Авторы признательны А. А. Краснобаеву, В. И. Поповой, В. А. Попову, В. А. Губину, Ю. В. Ерохину, Т. А. Осиповой, К. С. Иванову, П. С. Козлову, В. В. Мурзину за предоставленные образцы. Работа выполнена в рамках программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 02.740.11.0727), программ Президиума РАН № 20 и 23, проекта УрО РАН «Состав, структура и физика радиационно-термических эффектов в минералах» и гранта РФФИ 11-05-00035.

### Литература

- Вотяков С. Л., Хиллер В. В., Поротников А. В., Щанова Ю. В. Химическое датирование U-Th-минералов: методические аспекты // Литосфера. 2010. № 4. С. 94–115.
- Cocherie A., Albaredo F. An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite // Geoch. Cosmoch. Acta. 2001. V. 65. No. 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., Förster 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 // Sedim. Geol. 1991. V. 75. P. 141–147.
- Suzuki K., Kato T. CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data // Gondwana Research. 2008. V. 14. P. 569–586.