

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

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

В последние годы, в связи с развитием техники электронного микрозондового анализа и с созданием программ численного обсчета аналитических данных, получил новый импульс в своем развитии метод изохронного химического датирования U-Th-Pb содержащих минералов – монацита, ксенотима, сфена и др., известный в литературе как метод CHIME (**chemical Th-U-total Pb isochron method**). Возрастающая популярность метода, на что указывает рост числа соответствующих публикаций [2], обусловлена его простотой, доступностью и низкой себестоимостью единичного анализа. Теоретическое обоснование методики CHIME приведено в работах [12, 14 и др.]; при этом неоднократно отмечалась удовлетворительная сходимость результатов химического датирования с изотопными данными (см., например, [8, 15 и др.]). Однако, несмотря на более чем пятнадцатилетнюю историю современного развития метода CHIME, и в настоящее время остаются нерешенными три основные группы проблем. Первая связана с его аппаратной реализацией, пробоподготовкой, выбором стандартов и др. (см., например, [9]). Большой проблемой при датировании остается высокая погрешность определения возраста, достигающая ± 45 млн. лет для моногенных объектов с возрастом от 0.3 до 3 млрд. лет [7], а также проблема воспроизводимости данных. Все это создает трудности при петрогенетической интерпретации получаемых результатов, а в ряде случаев – полную невозможность их использования (при оценке возраста в 300 млн. лет погрешность определения в ± 45 млн. лет представляется совершенно неудовлетворительной). Высокая неоднозначность (и погрешность) определения возраста возникает из-за низкой точности определения на микрозонде Pb (и, в меньшей степени, Th и U). Заметим, что в монаците, сфене и других U-Th-Pb-минералах даже при относительно высоких содержаниях этих элементов (PbO до 3–4, ThO₂ до 14, UO₂ до 25 мас. %) погрешность составляет не ниже 1, 0.3 и 0.5 отн. %, соответственно. Кроме того, ряд минералов (пироксид, монацит, ксенотим и др.) отличаются сложным переменным составом, а в ряде случаев – достаточно низким содержанием Pb, сопоставимым с пределом обнаружения этого элемента на микроанализаторе. Вследствие этого для каждого минерала приходится подбирать “ин-

дивидуальные” условия анализа, а также увеличивать продолжительность их единичного определения, что приводит к выгоранию под пучком поверхности образца и искажению аналитических данных. В некоторых случаях зерна минералов не превышают 5–10 мкм, что не допускает проведения параллельных измерений.

Вторая группа проблем, возникающих при датировании, связана с выбором схемы обсчета экспериментальных данных. На сегодня реализованы четыре основных метода датирования: из единичного анализа в точке [12]; из Me*-Pb-изохроны (здесь Me* = Th* и U* – некоторые “модифицированные” содержания элементов [14]); из расчёта U/Pb и Th/Pb-возрастов с использованием представления аналитических данных в трёхмерном Th-U-Pb-пространстве [13] или на упрощенной двумерной Th/Pb–U/Pb-изохронной диаграмме без поправки на нерадиоγενный Pb [7]. Ранее неоднократно предпринимались попытки решить проблему несовпадения датировок при разных обсчетах аналитических данных (см., например, [7]) на основе анализа экспериментальных результатов для U-Th-минералов из различных геологических объектов – магматических, метаморфических и других типов пород. Однако при этом решались лишь отдельные частные вопросы несогласованности датировок по некоторым конкретным пробам. Представляется, что этот подход, основанный на переборе случайных образцов с неопределенной временной эволюцией их U-Th-Pb-системы, лишь в отдельных случаях датированных по изотопным данным, носит частный характер и малопродуктивен в силу того, что он не может исчерпать все возможные случаи привноса-потери свинца, смешения разновозрастных подсистем и др. Общее решение задачи остается открытым. Представляется перспективным использовать для ее решения анализ временной эволюции некой модельной статистической U-Th-Pb-системы.

Третья группа проблем связана с геологической интерпретацией датировок по минералам – анализом замкнутости-незамкнутости их изотопной U-Th-Pb-системы по данным кристаллохимии и спектроскопии этих минералов. В этом направлении сделаны лишь самые первые шаги [15], что требует выполнения специализированных исследований.

Подводя итоги, следует констатировать, что и в настоящее время актуальны исследования по анализу различных вкладов в погрешность определения возраста, по решению вопросов, связанных с повышением воспроизводимости данных, объективности их анализа с возможностью отбраковки недостоверных результатов. Представляется, что подобное исследование наиболее перспективно в рамках анализа модельных данных.

Цель работы – анализ и совершенствование математических подходов для обработки аналитических геохронологических данных на основе исследования временной эволюции модельной U-Th-Pb-системы, повышение воспроизводимости и объективности анализа с возможностью отбраковки недостоверных результатов при экспериментальном определении возраста в методике химического датирования минералов-концентраторов урана и тория (на примере проб из ряда геологических объектов Урала).

Геологические объекты и минералы. Исследованы U-Th-Pb-минералы (монацит, уранинит, торит, торрианит) из различных геологических объектов Урала – магматических, метаморфических и других типов пород. Се-монациты – из гранитных пегматитов обрамления Ильменогорского щелочного массива (пробы В.А. и В.И. Поповых); минералы в виде крупных зерен (размером до 1 см) слагают акцессорную вкрапленность. Ураниниты – из гранитоидов Первомайского массива (далее уранинит-1, пробы Т.А. Осиповой) и доюрского фундамента Западной Сибири (уранинит-2, пробы К.С. Иванова), а также из кварц-сульфидных жил Пышминско-Ключевского месторождения (уранинит-3, пробы В.В. Мурзина); в изученных геологических объектах минерал обычно слагает мелкие индивиды размером до 5–10 мкм и образует акцессорную вкрапленность. Торит – из гранитоидов доюрского фундамента Западной Сибири (пробы К.С. Иванова); минерал отмечается в виде акцессорной вкрапленности зерен размером до 50 мкм, причем большая часть проб не пригодна для исследований из-за существенного “разрушения” под действием радиации; нами изучен ряд относительно хорошо сохранившихся “свежих” торитов в полированных шлифах. Торрианиты – из карбонатитоподобных пород доломитового состава Карабашского гипербазитового массива (пробы Ю.В. Ерохина); они слагают мелкую вкрапленность размером не более 10–15 мкм.

Экспериментальное оборудование и методики. Элементное картирование и анализ микрокристаллов минералов в шашках и в полированных шлифах выполнен на микроанализаторе SX 100 (Самеса) 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 электронов, сфокусиро-

ванных на образце 2 мкм; среда – вакуум (10^{-5} Па) [5]. В качестве эталонов использовались торрианит, уранинит, пироп, ксенотим, монацит-(Ce), монацит-(La), $Pb_2P_2O_7$, монацит-(Nd), монацит-(Sm), $Ca_2P_2O_7$, $EuPO_4$, $TrPO_4$ и $SrSO_4$. Анализ U проводился по его $M\beta$ линии (кристалл LPET), Pb и Th – по Ma -линиям (кристаллы LPET и PET, соответственно); Y – по La линии (кристалл PET); Ce, La, Nd, Eu, Tb, Dy, Er, Tm, Yb по La линиям и Pr, Sm, Gd, Ho по $L\beta$ линиям (кристалл LIF); Ca, P, S, Fe – по $K\alpha$ линиям (кристаллы PET, PET, PET и LIF, соответственно). Время набора импульсов на аналитическом пике в два раза превосходило время измерения интенсивностей фона с каждой стороны от пика. Проанализирована динамика изменения погрешностей определения элементов ΔPb , ΔU и ΔTh при изменении времени экспозиции (накопления) τ их аналитических линий ($M\beta$ -линии U, $M\alpha$ -линий Th и Pb) в интервале от 5 до 600 с. Показано, что при увеличении τ погрешности скорости счёта и определения содержания уменьшаются, причем динамика существенно различна для разных минералов и однотипных минералов различного состава. В уранинитах, начиная с 200–300 с, тренд уменьшения погрешности выполаживается, минимальная погрешность достигается при 200 с, дальнейшее увеличение времени нецелесообразно. В торитах, начиная с 300 с, погрешность перестает уменьшаться; отмечено, что при 600 с и выше поверхность торита значительно “выгорает” под пучком и при этом искажаются содержания элементов. В торрианите погрешность минимальна при 100–200 с. В монацитах, с увеличением времени погрешность постепенно уменьшается; но даже при 100 с крупные зерна минерала достаточно неустойчивы к локальному нагреву (их поверхность выгорает). В результате исследования использованы следующие времена накопления аналитической линии (200–300 с для U, Th и Pb, 10 с для остальных элементов – Y, La, Ce, Nd, Pr, Ca, Si, P, Eu, Sm, Tb, Fe, Dy, Er, Gd, Ho, S); их верхний предел ограничен как процессом выгорания поверхности образца, так и нецелесообразностью увеличения продолжительности единичного анализа, нижний – минимальным временем измерения, при котором реализуются приемлемые погрешности определения элементов и как следствие погрешности определения возраста.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

I. Временная эволюция модельной U-Th-Pb-системы. В настоящей работе предпринята попытка решить проблемы согласования подходов для обработки аналитических данных, их совершенствования и формулировки более строгих ограничений по их применимости на основе исследования временной эволюции некой модельной статистической U-Th-Pb-системы при варьировании всех ее

основных характеристик: возраста (T_m), начального содержания и соотношения U и Th, их средне-квадратичных отклонений (СКО), имитирующих неоднородность состава минерала по U-Th, наличия нерадиоогенного ($PbO^H \neq 0$) и потерь радиоогенного Pb, в том числе непропорциональных для двух изотопных систем (^{208}Pb и ^{207}Pb - ^{206}Pb), а также количества статистических реализаций системы (N), имитирующих число микронзондовых определений состава минерала. Процедура моделирования возрастной эволюции U-Th-Pb-системы включала два этапа. На первом этапе принимались некие произвольные, но соответствующие экспериментальным данным значения для начальных содержаний UO_2^H , ThO_2^H , PbO^H и их СКО в системе, а также погрешности определения конечных содержаний $\Delta U/U$, $\Delta Th/Th$ и $\Delta Pb/Pb$, причем, рассматривался случай как высокоурановой ($Th \ll U$), так и высокоторийевой ($U \ll Th$) системы, содержащей и нерадиоогенный свинец $PbO^H \neq 0$. Далее, в соответствии с уравнениями радиационного распада изотопов:

$$Pb^k = Pb_{\text{нео}} + {}^{208}Pb + {}^{207}Pb + {}^{206}Pb = Pb_{\text{нео}} + {}^{232}Th \{ \exp(\lambda_{232}t) - 1 \} + {}^{235}U \{ \exp(\lambda_{235}t) - 1 \} + {}^{238}U \{ \exp(\lambda_{238}t) - 1 \},$$

$${}^{232}ThO_2^k = {}^{232}ThO_2^H \exp(-\lambda_{232}t),$$

$${}^{235}UO_2^k + {}^{238}UO_2^k = {}^{235}UO_2^H \exp(-\lambda_{235}t) + {}^{238}UO_2^H \exp(-\lambda_{238}t),$$

рассчитывались конечные содержания PbO^k , UO_2^k и ThO_2^k при некоторых фиксированных значениях возраста $t = T_m$, которые принимались равными 50, 100, 200 млн. лет и так далее, для обеих U-Pb- и Th-Pb-подсистем (здесь $\lambda_{232}, \lambda_{235}, \lambda_{238}$ – константы радиоактивного распада изотопов U и Th). Заметим, что при $СКО(U, Th) = 5-30\%$ как начальные отношения этих элементов, так и конечные в момент времени T_m не фиксированы для различных реализаций системы, поскольку они существенно “размыты” статистикой. Таким образом, моделировалась некая статистическая реализация (выборка) конкордантных (изохронных) данных. Дискордантные данные моделировались двояко: либо простейшим сложением двух и более близких конкордантных (изохронных) данных (случай смешения микронзондовых данных по разновозрастным зонам кристаллов с $T_{\text{мод}} = 190 \pm 5, 10$ млн. лет и так далее), либо моделированием в системе потерь радиоогенного свинца, в том числе непропорциональных для ^{208}Pb и ^{207}Pb - ^{206}Pb (имитация их диффузии из кристалла или его отдельных зон при температурах выше закрытия U-Pb и/или Th-Pb-подсистемы). Случай добавки или потери материнских изотопов U и Th нами не рассматривался. Заметим, что в различных кристаллических структурах минералов радиационно-стимулированная диффузия изотопа ^{208}Pb – продукта распада ^{232}Th – может отличаться от таковой для ^{207}Pb и ^{206}Pb – продуктов распада ^{235}U и ^{238}U [4] – что и вызывает проявление дискордантных данных (см., например, [7], где отмечается наличие двух типов Pb, полученных в результате радиоактивного распада

U и Th). В “диффузионном приближении” в рамках закона Фика потери элемента в системе (в каждой точке минерала) пропорциональны его локальному содержанию в ней: $PbO_d^k = \alpha \times PbO^k$, где α – некоторый параметр, меньший единицы. Заметим, что имеющиеся экспериментальные данные о неравенстве U/Pb и Th/Pb-возрастов указывают на то, что изотопные U-Pb (и/или Th-Pb) подсистемы не оставались закрытыми, то есть в диффузионной модели $\alpha(^{208}Pb) \neq \alpha(^{207}Pb, ^{206}Pb)$. Но при этом изотопные данные для монацита указывают на то, что его U-Pb-подсистема, как правило, закрытая. Вопрос о закрытости (открытости) Th-Pb-подсистемы на изотопном уровне остается и до настоящего времени практически не решенным.

На втором этапе по содержаниям UO_2^k , ThO_2^k и PbO^k (или PbO_d^k), соответствующим некоторым значениям T_m , рассчитывался возраст системы с использованием четырех различных подходов – из единичной статистической реализации системы – значений ThO_2^k , UO_2^k и PbO^k , следуя [12] (далее возраст $T_p^{U-Th-Pb}$), с использованием представления аналитических данных в трёхмерном Th-U-Pb-пространстве [13] (далее возраста ${}^{3d}T_p^{U-Pb}$ и ${}^{3d}T_p^{Th-Pb}$), а также из двух типов модельных изохрон, получаемых на диаграммах Th/Pb vs. U/Pb, следуя [7] (далее ${}^{2d}T_p^{U-Pb}$ и ${}^{2d}T_p^{Th-Pb}$), и $MeO_2^* \text{ vs. } PbO$ ($Me = Th$ или U), следуя [15] (далее $T_p^{U^*-Pb}$ и $T_p^{Th^*-Pb}$), где ThO_2^* – некоторое “модифицированное” содержание, равное $(ThO_2 + UO_2^{*кв})$, а $UO_2^{*кв}$ – содержание U, пересчитанное в эквивалентное содержание Th, которое могло бы “произвести” то же количество Pb за время жизни системы при равенстве U/Pb и Th/Pb-возрастов; $UO_2^* = UO_2 + ThO_2^{*кв}$). Заметим, что Me^* -Pb-изохронный подход справедлив при условии фиксированного содержания нерадиоогенного Pb; как правило, он применяется в двух предельных случаях – высокоторийевой и высокоурановой системы. При расчете возраста погрешности определения содержания элементов $\Delta U/U^k$, $\Delta Th/Th^k$ и $\Delta Pb/Pb^k$ принимались равными значениями, которые стандартно реализуются в экспериментах на микронзонде – порядка n%. В Me^* -Pb-изохронном подходе при расчетах $T_p \pm \Delta T_p$, а также средне-квадратичных взвешенных отклонений (СКВО) использовалась программа, в основу которой положен алгоритм ортогональной регрессии Йорка [17], а не традиционный метод наименьших квадратов; в двумерном Th/Pb-U/Pb- и трехмерном Th-U-Pb-изохронном подходе использовалась программа Isoplot 3.66 [11]. В подходе [12] значение возраста рассчитывалось по программе фирмы Самеса с “защитым” в ней выражением для определения погрешности:

$$\Delta t = \frac{\Delta Pb + \frac{208}{232} (e^{\lambda_{232}t} - 1) \Delta Th + \left[\frac{0.9928 \times 206}{238} (e^{\lambda_{238}t} - 1) + \frac{0.0072 \times 207}{235} (e^{\lambda_{235}t} - 1) \right] \Delta U}{\left[\frac{208Th}{232} \lambda_{232} e^{\lambda_{232}t} + \frac{206U}{238} 0.9928 \lambda_{238} e^{\lambda_{238}t} + \frac{207U}{235} 0.0072 \lambda_{235} e^{\lambda_{235}t} \right]}$$

В качестве показателя корректности датировки предложен параметр δ , равный отношению ее модельного и расчетного возрастов $(T_p - T_m) / T_m$; исходя из практических требований датировки реальных геологических объектов условие корректности датировки определено нами как $|\delta| < 5\%$.

А. Расчет возраста из модельной Th*-Pb-изохроны для высокотермической системы; конкордантные данные. Для выборки из $N = 5-100$ различных статистических реализаций содержания ThO_2^k , UO_2^k , PbO^k (PbO_d^k) в U-Th-Pb-системе, имитирующих N микрозондовых измерений в разных точках минерала, проводилось построение и анализ модельной изохроны в координатах ThO_2^* vs. PbO (при $\text{Th} \gg \text{U}$) или UO_2^* vs. PbO (при $\text{U} \gg \text{Th}$), здесь:

$$\text{ThO}_2^* = \text{ThO}_2 + \text{UO}_2 (W_{\text{Th}} / W_{\text{U}}) [\{ \exp(\lambda_{235}t) + 137.88 \times \exp(\lambda_{238}t) \} / 138.88 - 1] / \{ \exp(\lambda_{232}t) - 1 \},$$

$$\text{UO}_2^* = \text{UO}_2 + 138.88 \text{ThO}_2 W_{\text{U}} \{ \exp(\lambda_{232}t) - 1 \} / [W_{\text{Th}} \{ 137.88 \times \exp(\lambda_{238}t) + \exp(\lambda_{235}t) - 138.88 \}],$$

где W – молекулярный вес оксидов U, Th и Pb. По углу наклона изохроны оценивался Me*/Pb-возраст системы (его физико-химический смысл не однозначен и дискутируется в публикациях) с одновременной оценкой содержания нерадиогенного Pb; однако при этом неявно предполагается, что во всех статистических реализациях (исследованных точках минерала) содержится его одинаковое количество, что достаточно маловероятно и оспаривается оппонентами. Получаемые при этом моделировании данные можно рассматривать как результаты микрозондового анализа в рамках метода СИМЕ в

пределах различных областей одного гетерогенного кристалла и (или) различных гомогенных кристаллов одного (близкого) возраста.

На рис. 1а представлены типичные модельные данные для высокотермической системы при различных значениях ее возраста и в предположении, что нерадиогенный свинец отсутствует; все они в координатах ThO_2^* vs. PbO укладываются на изохроны, проходящие через начало координат; возраста для четырех статистических реализаций системы с $T_m = 50, 100, 200$ и 500 млн. лет составляют $50.4 \pm 0.153, 99.9 \pm 0.322, 200.0 \pm 0.716, 498.0 \pm 2.27$ млн. лет, соответственно (СКВО = 0.7–1.0, причем его вариации от возраста нерегулярны). Заметим, что приведенные величины T_p , ΔT_p и СКВО не имеют абсолютного значения, так как являются результатом обсчета некоторой конкретной реализации изохроны, но при этом они могут рассматриваться, как показатели объективной оценки “качества” изохроны с возможностью отбраковки недостоверных результатов.

Установлено, что в интервале значений $T_m = 50-2000$ млн. лет погрешность ΔT_p возрастает с ростом T_m ; значение СКВО составляет 0.7–1.0 и от возраста практически не зависит. Нами проанализирована выборка из 50 статистических реализаций модельных изохрон системы при фиксированных значениях всех ее параметров, в том числе и возраста в 200 млн. лет; на рис. 3 в поле I расположены соответствующие значения расчетных возрастов $T_p^{\text{Th}^*\text{-Pb}}$ и их погрешностей. Видно, что при использованных параметрах системы статистически обоснованное значение погрешности ее датировки в ± 1.7 млн. лет является предельно достижимой ве-

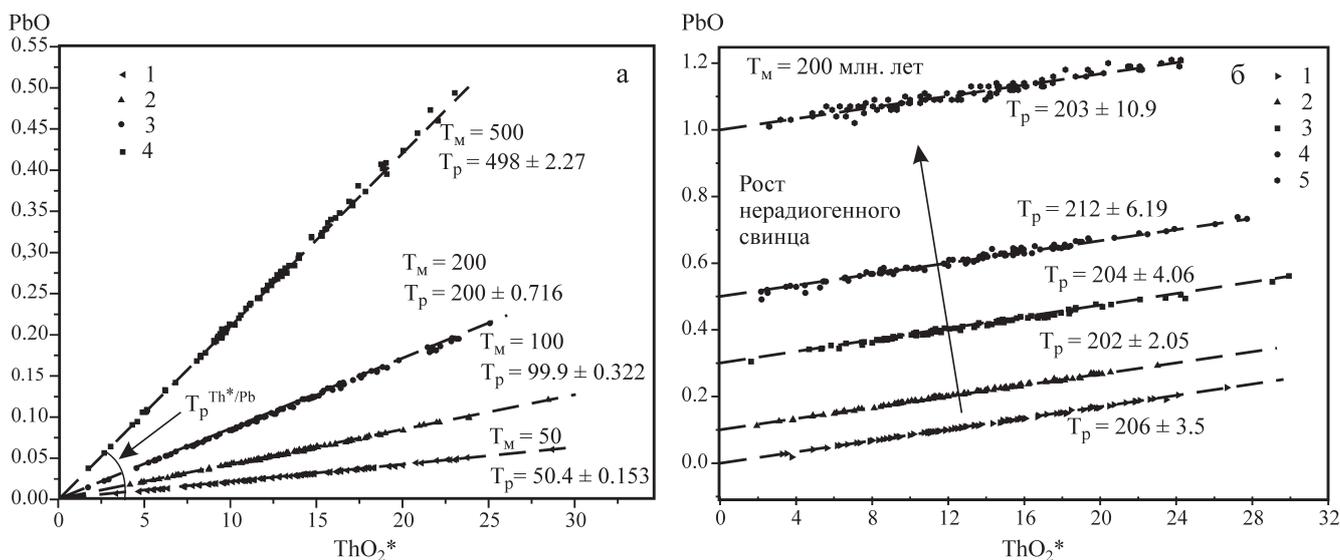


Рис. 1. Th*-Pb-данные для модельной высокотермической системы различного возраста (а) и с возрастом 200 млн. лет и различным содержанием нерадиогенного Pb (б).

а: 1 – $T_m = 50$, 2 – 100, 3 – 200, 4 – 500 млн. лет; б: 1 – $\text{PbO}^n = 0$, 2 – 0.1, 3 – 0.3, 4 – 0.5, 5 – 1.0%. Здесь и на рис. 2–6 содержание $\text{UO}_2^n = 1$, $\text{ThO}_2^n = 10\%$; СКВО $\text{UO}_2^n = \text{ThO}_2^n = \text{PbO}^n = 30\%$; $\Delta U/U = \Delta \text{Th}/\text{Th} = \Delta \text{Pb}/\text{Pb} = 1\%$; $N = 100$; пунктир – линии регрессии (изохроны).

личной в некотором идеализированном эксперименте с минералом, в котором присутствует только радиогенный Pb и его потери пренебрежимо малы. Показатель корректности датировки $\delta < 2\%$.

Погрешность определения возраста $\Delta T_p^{Th^*-Pb}$ по изохроне зависит от соотношения числа статистических реализаций системы, имитирующих количество точечных микрозондовых измерений N , по которому она строится, и величины СКО содержаний U и Th, имитирующей неоднородность состава минерала по U-Th. В частности, для системы с возрастом 200 млн. лет и при СКО = 30% уменьшении N от 100 до 10 вызывает рост погрешности ΔT_p практически на порядок; снижение СКО от 30 до 5–10% при сохранении числа $N = 100$ также увеличивает погрешность, но более чем на порядок. Таким образом, чем ниже СКО, тем выше должно быть N , чтобы величины погрешности значимо не возрастала.

Величина ΔT_p напрямую зависит от погрешности определения концентраций, в первую очередь $\Delta Pb/Pb$: при ее росте от 1 до 5–20%, что может реализоваться в экспериментах с “молодыми” пробами при низких и сверхнизких содержаниях Pb, величина ΔT_p возрастает от 1.7 до 9.8, 11.7 и 31.4 млн. лет, соответственно (данные для некоторой статистической реализации возрастной эволюции системы с возрастом в 200 млн. лет). Заметим, что вклад $\Delta U/U^*$ и $\Delta Th/Th^*$ в ошибку микрозондовых анализов менее значимый, поскольку содержание этих материнских элементов выше, чем дочернего свинца практически для всех минералов из рассматриваемого возрастного интервала от 50 до 2 000 млн. лет.

Учитывая, что погрешность определения Th^*-Pb -возраста в модельной гомогенной системе составляет в среднем величину, не превышающую 2 млн. лет (см. рис. 3) в интервале возрастов 50–300 млн. лет, можно полагать, что это число является пределом “возрастного разрешения” отдельных компонент из суперпозиции нескольких разновозрастных конкордантных данных. Действительно, расчет возраста для совокупности двух независимых высокотемпературных конкордантных систем с возрастом $T_m = 180$ и 190 млн. лет, рассматриваемых как единая одновозрастная “псевдогомогенная” система, дает значение $T_p^{Th^*-Pb} = 193.3 \pm 5.6$ млн. лет, но при этом повышенная величина СКВО (14.76!) однозначно указывает на негомогенность системы. В суперпозиции данных, минимизируя значение СКВО, удается выделить две гомогенные совокупности, причем для первой возраст составляет 181.1 ± 1.8 (СКВО = 0.98), а для второй – 201.2 ± 2.2 млн. лет (СКВО = 0.91). Таким образом, можно говорить, что в Me^*-Pb -изохронном подходе возможна оценка степени отклонения системы от гомогенности с выделением разновозрастных составляющих.

Дискордантные данные. Введение в систему нерадиогенного Pb вызывает практически парал-

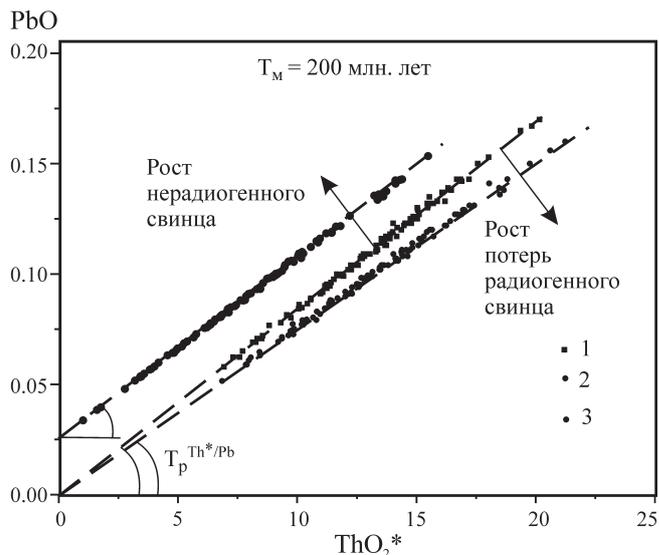


Рис. 2. Th^*-Pb -данные для модельной высокотемпературной системы с возрастом 200 млн. лет и различным содержанием нерадиогенного Pb (1, 2 – $PbO^* = 0$; 3 – 0.25%) и потерями радиогенного (1, 3 – $PbO^* = 0$; 2 – 10%).

лельный сдвиг всех Th^*-Pb -изохрон вверх от начала координат на величину, которая близка к значению PbO^* (рис. 16), то есть значение Th^*-Pb -возраста при этом сохраняется. Заметим, что при расчетах величина PbO^* рассматривалась нами как случайная со СКО = 5–30%, что, как представляется, более соответствует составу реальных мине-

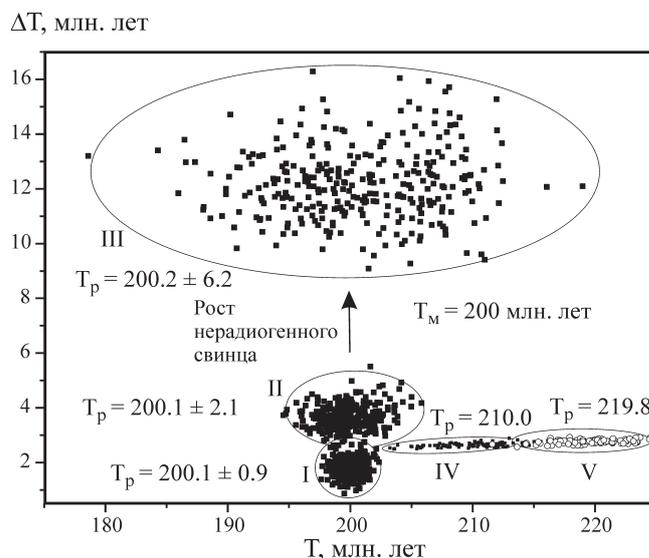


Рис. 3. Значения возрастов T_p и ΔT_p для 50 статистических реализаций Th^*-Pb -изохрон (поля I–III) с возрастом 200 млн. лет при $PbO^* = 0, 0.1$ и 0.5% и значения T_p и ΔT_p , полученные, следуя [12], для 100 различных статистических реализаций систем с возрастом 210 (поле IV) и 220 млн. лет (V).

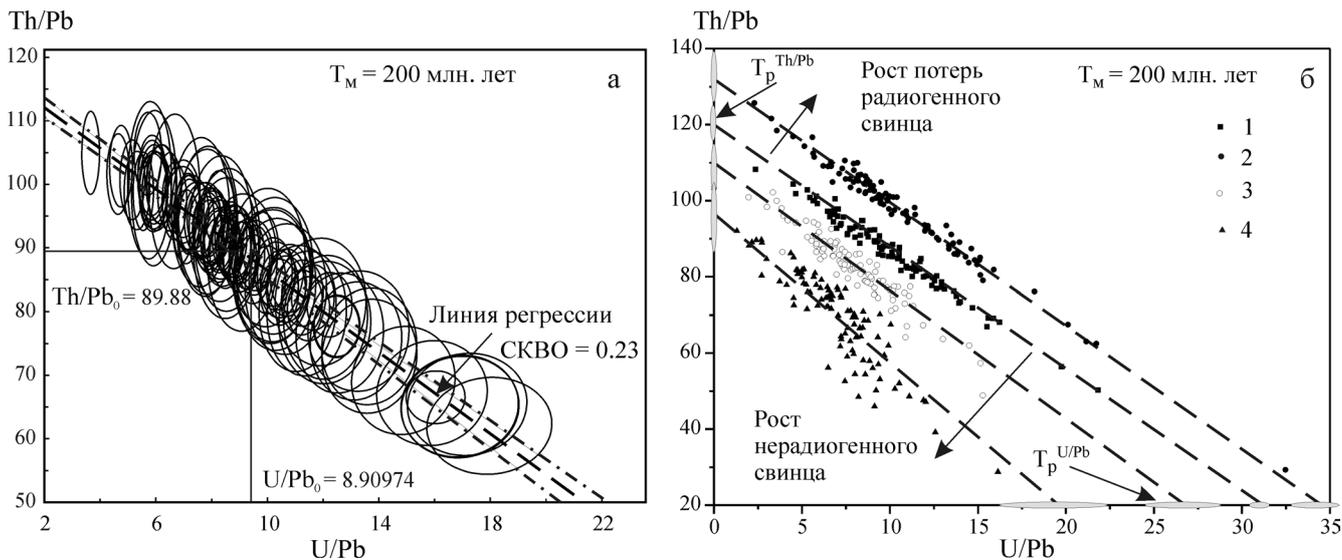


Рис. 4. Th/Pb-U/Pb-данные для модельной системы с возрастом 200 млн. лет (а) и различным содержанием нерадиогенного и потерями радиогенного свинца (б).

а и 16 – PbO^H , $PbO^A = 0$; 26 – $PbO^H = 0$, $PbO^A = 10\%$; 36 – $PbO^H = 0$, $PbO^A = 0.01\%$; 46 – $PbO^H = 0$, $PbO^A = 0.03\%$. Эллипс – ошибка 2σ ; пунктир – линии регрессии (изохроны); штрих-пунктир – две симметричные гиперболы, фиксирующие ошибки; x_0 и y_0 – координаты средневзвешенной точки на линии регрессии.

ралов. Введение нерадиогенного Pb значительно увеличивает погрешность датировки: на рис. 3 представлены значения возрастов и их погрешности для 50 статистических реализаций изохрон в системе с возрастом 200 млн. лет и различным содержанием нерадиогенного Pb. Увеличение PbO^H до 0.1% при-

водит к увеличению погрешности до 4 млн. лет, а при $PbO^H = 0.5\%$ величина ΔT_p составляет уже 13 млн. лет. Значение SKBO также увеличивается с ростом добавки нерадиогенного Pb, но при этом само расчетное значение возраста системы практически сохраняется близким к T_M , то есть значимого “удревления” системы за счет этой добавки в Th*-Pb-изохронном подходе не фиксируется: численный параметр $\delta^{Th^*-Pb} < 3-5\%$ (рис. 4).

Анализ модельных дискордантных данных, полученных при различных потерях радиогенного свинца $PbO_d^k = \alpha \times PbO^k$ (при равенстве $\alpha(^{208}Pb)$ и $\alpha(^{207}Pb, ^{206}Pb)$) показывает, что они удовлетворительно укладываются на Th*-Pb-изохроны, проходящие через начало координат, но с существенно заниженным значением возраста (рис. 2 и 3). В частности, для системы с возрастом 200 млн. лет значения $T_p^{Th^*-Pb} = 201.0 \pm 2.1$ (СКВО = 0.7–1.0), 199.0 ± 1.6 (СКВО = 0.7–16.0), 189.0 ± 1.3 (СКВО = 0.7–5.0) и 180.0 ± 2.0 млн. лет (СКВО = 0.7–1.0), соответственно, при $\delta = 1.00$ (когда потери отсутствуют), 0.99, 0.95 и 0.90. Видно, что диффузионные потери Pb до 10% приводят к значимому (до 10%) омоложению системы и увеличению погрешности датировки: численный параметр $\delta^{Th^*-Pb} \gg 3-5\%$ (см. рис. 5). При этом отмечается и тенденция роста SKBO, хотя в ряде реализаций фиксируются их аномальные значения, которые, по-видимому, обусловлены неустойчивостью алгоритма ортогональной регрессии Йорка, лежащего в основе программы обчета данных.

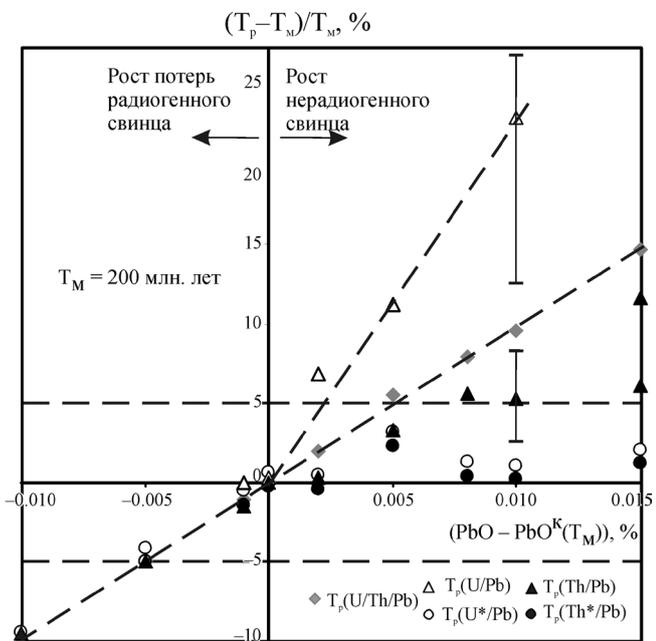


Рис. 5. Зависимость параметра $\delta = (T_p - T_M) / T_M$, рассчитанного из единичной реализации (1) и из Th/Pb-U/Pb (2, 3), Th*-Pb (4) и U*-Pb-изохрон (5) для модельной системы с возрастом 200 млн. лет, от содержания нерадиогенного и потерь радиогенного Pb.

Подводя итоги, можно констатировать, что параметр δ^{Me^*-Pb} (см. рис. 5), характеризующий корректность датировки, в частности, системы с возрастом

200 млн. лет и содержанием $UO_2^H = 1$, $ThO_2^H = 10\%$, не превышает 3–5% при условии, что потери Pb не превосходят 0.03–0.05%; влияние добавки нерадиоогенного Pb менее критично: при величинах PbO^H до 0.15% $\delta^{Me^*-Pb} < 1\%$. Важно отметить, что никаких внутренних “проверок” корректности датировки (оценки $T_p^{Me^*-Pb}$) в рамках данного подхода провести не удается, что указывает на невысокую перспективность его использования.

Высокоурановая система. Несмотря на существенное различие временных констант λ_{232} и $\lambda_{235, 238}$ распада изотопов ^{232}Th и ^{235}U , ^{238}U , для высокоурановой системы (при $UO_2^H \gg ThO_2^H$), имитирующей урановые минералы – уранинит и др., поведение U^*-Pb изохрон качественно не отличаются от такового для аналогичной по возрасту высокоторийевой системы при условии совпадения всех остальных кроме UO_2^H и ThO_2^H параметров – T_m , N и др. Зависимости “степени корректности” датировок обеих систем (значения δ^{Me^*-Pb} , $\Delta T_p^{Me^*-Pb}$ и СКВО) от N , СКО и других параметров во многом близки. Для предельных случаев моноэлементных систем, когда один из материнских элементов отсутствует (ThO_2^H или $UO_2^H = 0$), отмечено, что погрешность $\Delta T_p^{Me^*-Pb}$ и СКВО принимают минимальные значения.

Интересна система с сопоставимыми содержаниями $UO_2^H \approx ThO_2^H$; в этом случае Th^*-Pb и U^*-Pb изохроны равноправны (последний может реализоваться на практике для некоторых силикатов высокозарядных катионов – циркона и др.). Установлено, что оба возраста $T_p^{U^*-Pb}$ и $T_p^{Th^*-Pb}$, вычисленные независимо по двух типам изохрон близки, причем погрешности их определения и СКВО составляют, в частности, для системы с возрастом 200 млн. лет – $\Delta T_p = 2.32\%$, СКВО = 5.2 для U^*-Pb возраста и 2.29%, 5.1 – для ториевого. Таким образом, можно сделать вывод, что Me^*-Pb -изохронный подход может быть эффективно использован при обработке микрозондовых данных для минералов с существенно различным соотношением U и Th .

Б. Расчет возрастов из $Th/Pb-U/Pb$ -изохроны; конкордантные данные. На рис. 3 представлены типичные статистические результаты для модельной высокоторийевой системы с возрастом 200 млн. лет и в предположении, что нерадиоогенный Pb отсутствует при $N = 100$; на диаграмме Th/Pb vs. U/Pb они укладываются на изохрону, а $Th-Pb$ и $U-Pb$ возраста рассчитываются независимо, как координаты точек пересечения изохроны с осями координат и составляют 200.33 ± 3.36 и 200.50 ± 10.12 млн. лет (СКВО = 0.23), то есть несмотря на достаточно большое различие содержаний Th и U , и как следствие “приуроченность” точек на изохроне к оси Th/Pb , $Th-Pb$ и $U-Pb$ возраста удовлетворительно согласуются с T_m (см. рис. 5). Погрешность определения возрастов определяется соотношением содержаний U и Th , числом статистических реализаций системы N , по которому строится изохрона, и величинами

СКО U и Th : с ростом двух последних параметров и “сближением” содержаний U и Th погрешности определения возрастов уменьшаются. Введенные выше численные параметры δ^{Th-Pb} и δ^{U-Pb} , характеризующие корректность датировки, не превышают 3–5% при $N > 20$, СКО > 15 –18%. В целом, можно сделать вывод, что $Th/Pb-U/Pb$ -изохронный подход достаточно критичен к соотношению содержаний U и Th , величине N и СКО. Как правило, он эффективен лишь при обработке микрозондовых данных для минералов с близким содержанием U и Th .

Величина ΔT_p и параметр δ зависят от погрешности определения концентраций, в первую очередь $\Delta Pb/Pb^k$. Погрешности определения $Th-Pb$ и $U-Pb$ возрастов в модельной гомогенной системе составляет в среднем величину не более 5 млн. лет в интервале 50–300 млн. лет можно предположить, что это число является пределом для “разрешения” отдельных компонент из суперпозиции нескольких разновозрастных конкордантных данных. Для проверки нами выполнен расчет возраста для некой совокупности двух независимых конкордантных систем с возрастом $T_m = 215 \pm 5$ и ± 8 млн. лет, рассматриваемой как единая разновозрастная “псевдогомогенная” система. Для системы $T_m = 215 \pm 5$ млн. лет получено, что параметр $\delta = 2.55\%$, значение СКВО = 23 однозначно указывает на негомогенность системы. В суперпозиции однозначно выделяются две подсистемы, причем для первой возраст составляет 209.79 ± 1.81 млн. лет (СКВО = 6.5), а для второй – 220.29 ± 1.94 млн. лет (СКВО = 5.7). Для системы $T_m = 215 \pm 8$ млн. лет получено, что параметр $\delta = 1.68\%$, значение СКВО = 50 однозначно указывает на негомогенность системы. В суперпозиции также выделяются две подсистемы, причем для первой возраст составляет 206.00 ± 1.62 млн. лет (СКВО = 5.5), а для второй – 222.30 ± 1.78 млн. лет (СКВО = 5.7). Таким образом, можно говорить, что в $Th-Pb$ и $U-Pb$ -изохронном подходе возможна оценка степени отклонения системы от гомогенности с выделением разновозрастных составляющих.

Дискордантные данные. По определению, $Th/Pb-U/Pb$ -изохронный подход не допускает наличия в системе нерадиоогенного Pb; его введение вызывает отклонение модельных данных от изохронной зависимости – расчетные данные не укладываются на изохроны, то есть $Th-Pb$ и $U-Pb$ возраста не совпадают и составляют $T_p^{Th-Pb} = 210.57 \pm 4.53$ млн. лет и 229.52 ± 8.63 млн. лет, а $T_p^{U-Pb} = 245.42 \pm 14.12$ млн. лет и 345.58 ± 23.74 млн. лет (СКВО = 48.15 и 118.00) (данные для некоторой конкретной статистической реализации системы с возрастом 200 млн. лет), соответственно, при $PbO^H = 0.01$ и 0.03%. Численные оценки показывают, что отклонение от изохроны, фиксируемые по росту параметра δ свыше 5%, наступает уже при $PbO^H = 0.008\%$ (для системы с возрастом 200 млн. лет).

Нами проанализированы также модельные дискордантные данные, полученные при различных потерях радиогенного свинца. Установлено, что точки не отклоняются от изохрон, а Th-Pb и U-Pb-возраста близки и составляют $T_p^{Th-Pb} = 197.05, 190.10, 181.03, 159.57$ млн. лет, а $T_p^{U-Pb} = 200.02, 190.09, 178.66, 162.74$ млн. лет (СКВО = 4.7, 5.4, 6.0 и 4.2) (данные для некоторой конкретной статистической реализации), соответственно при $\alpha = 0.99, 0.95, 0.90$ и 0.80 . Видно, что потери радиогенного Pb до 20% не приводят к различию возрастов системы.

Независимый расчет Th-Pb и U-Pb-возрастов из модельной изохроны с нерадиогенным Pb приводят к получению существенно различных датировок, что может рассматриваться как критерий для их отбраковки.

В. Расчет возраста из единичной статистической реализации модельной системы; конкордантные данные. По единичным значениям ThO_2^k, UO_2^k и PbO^k , имитирующим результаты электронно-зондового анализа состава минерала в его отдельной точке, следуя [12], возможна датировка системы. При этом негласно полагается, что содержание нерадиогенного Pb пренебрежимо мало, величины ThO_2^k, UO_2^k и PbO^k связаны между собой радиоактивным распадом и изотопные U-Pb и Th-Pb-подсистемы закрыты, то есть U/Pb и Th/Pb-возраста совпадают, и потери Pb пренебрежимо малы. Наиболее наглядно графически этот подход можно представить на диаграмме Th/Pb vs. U/Pb (см. рис. 4) построением серии изохрон, проходящих через каждую единичную точку, при этом на координатных осях фиксируются значения конкордантных возрастов и погрешности их определения. Заметим, что данный подход не критичен к соотношению содержаний U и Th в минерале. На рис. 3 (поле IV) приведены типичные статистические данные для выборки из 50 единичных определений системы с возрастом 210 и среднее значение $T_p^{U-Th-Pb} = 210.0 \pm 2.6$ млн. лет. Последнее сопоставлено с результатом расчета Me*-Pb-изохронного возраста, полученного для системы с совпадающими параметрами (поле I); видно, что в изохронном подходе статобработка данных при построении каждой из изохрон приводит к существенному (почти в 2 раза) снижению погрешности определения возраста ($T_p^{Th*-Pb} = 199.9 \pm 1.7$ млн. лет). Статистическая обработка результатов единичных точечных расчетов возраста с определением среднего и его погрешности позволяет в некоторой степени нивелировать различия между погрешностями в этих двух подходах. Учитывая, что погрешность определения возраста из единичной статистической реализации модельной гомогенной системы при $N = 50$ составляет порядка 2–4 млн. лет в интервале возрастов 100–300 млн. лет можно утверждать, что это число является предельным для “временного разрешения” отдельных компонент из су-

перпозиции нескольких разновозрастных конкордантных данных. Для примера на рис. 3 представлены результаты, полученные при анализе совокупности двух независимых конкордантных систем с возрастом $T_m = 210$ и 220 млн. лет как единой разновозрастной, “псевдогомогенной” системы: видно, что при значимой статистике разновозрастные составляющие системы явно фиксируются и выделяются как два экстремума с $T_p^{U-Th-Pb} = 210.0$ и 219.8 .

Дискордантные данные. При расчете возраста из единичной статистической реализации системы полагается, что содержание нерадиогенного и потери радиогенного Pb пренебрежимо малы; в противном случае подход некорректен; представляется, что по параметру δ (рис. 5) можно оценить “степень его некорректности”. Установлено, что потери радиогенного Pb приводят к пропорциональному уменьшению возраста, в частности, для системы с $T_m = 200$ млн. лет $T_p^{U-Th-Pb} = 199.97 \pm 1.46, 197.05 \pm 1.47, 190.10 \pm 1.17, 181.03 \pm 1.38$ и 159.57 ± 0.95 млн. лет при $PbO^a = 0, 1, 5, 10$ и 20% , $\delta = 0.02, 1.47, 4.95, 9.48$ и 20.22% , соответственно; напротив, введение нерадиогенного Pb приводит к их удревнению: для той же системы $199.97 \pm 1.46, 210.57 \pm 4.53, 229.52 \pm 8.63$ и 315.15 ± 41.69 млн. лет при $PbO^a = 0, 0.01, 0.03$ и 0.10% , $\delta = 0.02, 5.28, 14.76$ и 57.58% , соответственно. Видно (рис. 5), что расчет возраста из единичной статистической реализации системы с возрастом 200 млн. лет и содержанием $UO_2^a = 1, ThO_2^a = 10\%$ корректен ($\delta < 3-5\%$) при условии, что PbO^a и PbO^b не превосходят $0.03-0.05\%$. Важно отметить, что никаких внутренних “проверок” корректности датировки (оценки $T_p^{U-Th-Pb}$) в рамках данного подхода провести не удастся, что указывает на невысокую перспективность его использования.

Г. Расчет возраста с использованием представления данных в Th-U-Pb-пространстве. Предложенный в [13] метод расчета возраста с использованием представления данных на трёхмерной ThO_2-UO_2-PbO -диаграмме в работах практически не используется из-за сложности расчета и низкой наглядности. В рамках этого подхода данные временной эволюции U-Th-Pb-системы (конечные содержания ThO_2^k, PbO^k, UO_2^k) аппроксимированы плоскостью вида $PbO = a \times ThO_2 + b + c \times UO_2$, где a, c и b – некоторые константы: $a = 0.848485 \{ \exp(\lambda_{232}t) - 1 \}$, $c = 0.816367 \{ \exp(\lambda_{235}t) - 1 \} + 0.0059475 \{ \exp(\lambda_{238}t) - 1 \}$ и b – усредненное для системы содержание нерадиогенного Pb. Из углов наклона линий пересечения этой плоскости с двумя координатными плоскостями ThO_2-PbO и UO_2-PbO определены U-Pb и Th-Pb-возраста. В частности, для модельной конкордантной системы (рис. 6) с возрастом $T_m = 200$ млн. лет ($UO_2^a = 1, ThO_2^a = 10\%$; СКВО $UO_2^a = ThO_2^a = 30\%$; $\Delta U/U = \Delta Th/Th = \Delta Pb/Pb = 1\%$; $N = 100$) получено, что константы a и c в уравнении плоскости регрессии равны 0.008423 ± 0.000071 и 0.02709 ± 0.00070 ,

соответственно (СКВО = 3.2); U-Pb и Th-Pb-возраст составляют 200.59 ± 5.08 и 199.66 ± 1.67 млн. лет, при этом содержание нерадиоогенного Pb $0.00013 \pm 0.00069\%$. Степень корректности датировки (значения δ , ΔT_p и СКВО) сопоставима с таковой, полученной в рамках Th/Pb-U/Pb-изохронного подхода.

Дискордантные данные. Введение в систему нерадиоогенного Pb вызывает практически параллельный сдвиг всех плоскостей $PbO = a \times ThO_2 + b + c \times UO_2$ вверх от начала координат на величину b , которая близка к значению PbO^H , то есть значение возрастов при этом сохраняется, однако введение нерадиоогенного Pb значимо увеличивает погрешность датировки: $T^{3D}_{Th} = 199.66 \pm 1.67$ и 201.71 ± 4.25 млн. лет; $T^{3D}_{U} = 200.59 \pm 5.08$ и 197.75 ± 13.07 млн.лет при $PbO^H = 0$ и 0.008 , соответственно.

Анализ дискордантных данных, полученных при различных потерях радиоогенного Pb, показывает, что они, тем не менее, удовлетворительно укладываются на плоскости в трёхмерном ThO_2 - UO_2 - PbO -пространстве, но с существенно заниженными значениями возрастов, при этом значимо увеличивается и погрешность датировки. В частности, для системы с возрастом 200 млн. лет значения U-Pb и Th-Pb-возрастов составляют 189.68 ± 778.77 и 221.63 ± 2385.17 млн. лет при потерях 5%: численный параметр $\delta \gg 3-5\%$.

II. Элементное картирование, химический состав и датирование Th-U-минералов. Исследованы монациты, ураниниты, торит и торрианит из различных геологических объектов Урала – магматических, метаморфических и других типов пород. На рис. 7 представлено распределение элементов Y, Pb, U и Th в зерне монацита из Восточно-Шебурской площади из доюрского фундамента Западной Сибири. После изучения зональности зерен, выполнен количественный анализ химического состава в отдельных точках на зерне. При этом проводился учет всех необходимых поправок – на

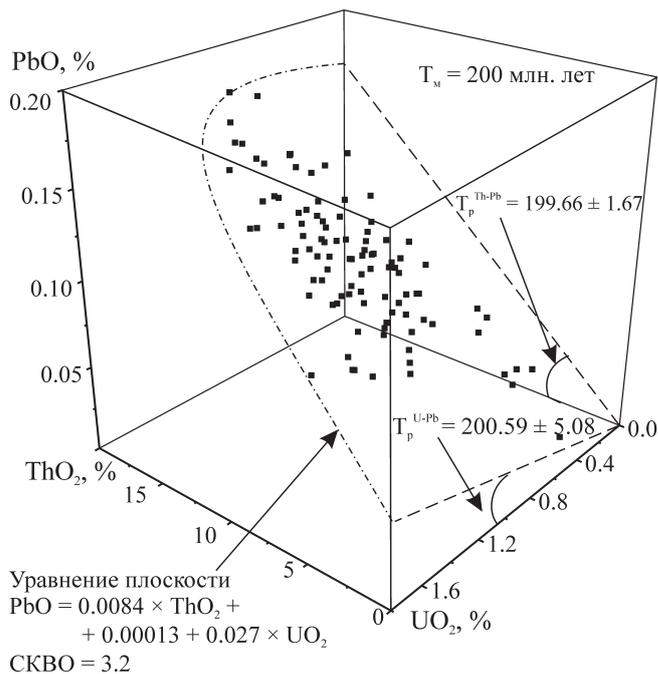


Рис. 6. Th-U-Pb-данные для модельной высокотемпературной системы с возрастом 200 млн. лет.

Штрих-пунктир – плоскость регрессии $PbO = 0.0084 \times ThO_2 + 0.00013 + 0.0271 \times UO_2$, пунктир – ее пересечения с двумя координатными плоскостями ThO_2 - PbO и UO_2 - PbO .

влияние матрицы и другие [16]. В исследуемых образцах монацитов обнаружено достаточно высокое содержание тория: в монаците-1 ThO_2 до 30, UO_2 – до 0.6, PbO – до 0.37 мас. %; в монаците-2 содержание ThO_2 до 23, UO_2 – около 1, PbO – до 0.3 мас. %. Результаты отдельных точечных анализов использованы для датировки монацита-2; получены значения в 240–247 млн. лет, погрешность 6.6%. На рис. 8 представлена Th^* -Pb-изохрона для Се-монацита гранитных пегматитов из обрамления Ильменогорского щелочного массива; существен-

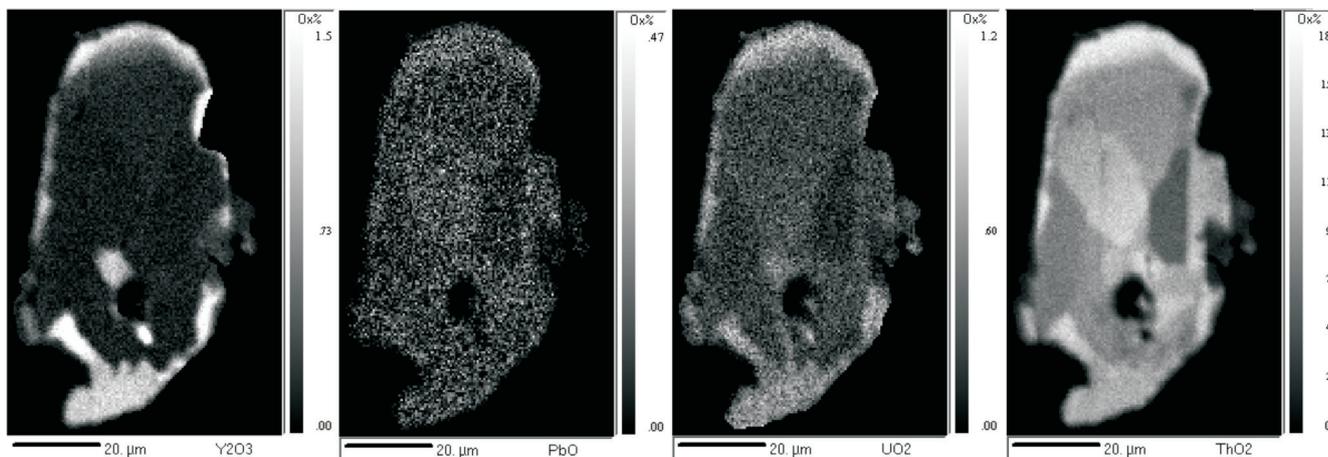


Рис. 7. Распределение элементов Y, Pb, U и Th в зерне монацита из Восточно-Шебурской площади, СКВ. 28-р.

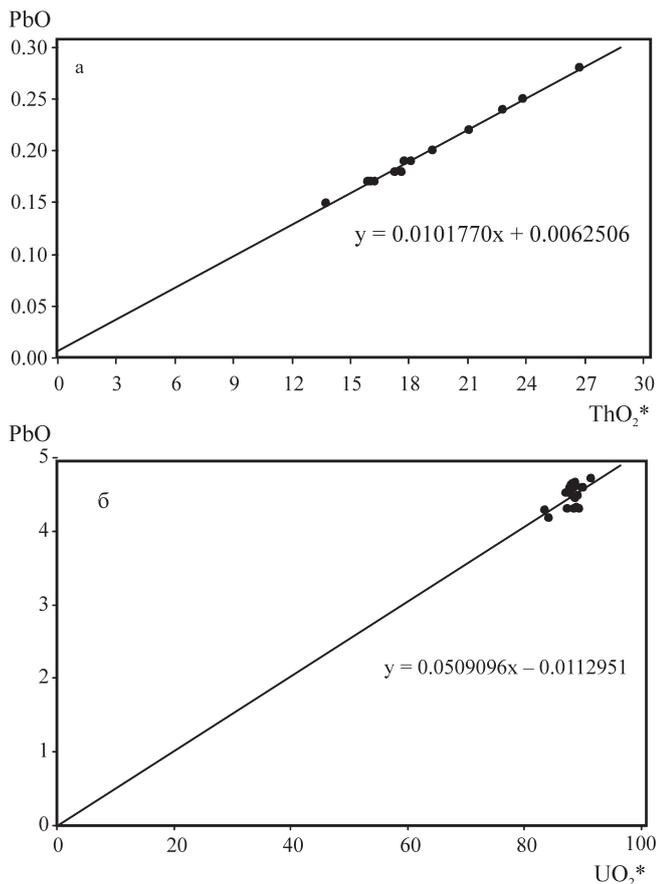


Рис. 8. Me*-Pb-данные для монацита гранитных пегматитов из обрамления Ильменогорского щелочного массива (а) и уранинита из кварц-сульфидных жил Пышминско-Ключевского месторождения (б).

ный разброс значений ThO_2^* (от 13.7 до 26.8%) позволяет с достаточно высокой точностью построить изохрону по 14 точкам, возраст составляет 242.99 ± 14.14 млн. лет.

Установлено, что в исследуемых уранинитах содержание UO_2 варьирует от 68 до 90, ThO_2 – от 1 до 15 и PbO – от 3.3 до 4.6 мас. %; по отдельным точечным анализам для трех разных проб минерала получены датировки в 270, 300 [6] и 370 млн. лет с относительными погрешностями 1.5–12%. На рис. 7 представлена **U*-Pb-изохрона для уранинита-3** из кварц-сульфидных жил Пышминско-Ключевского месторождения; малый разброс значений UO_2^* (от 83 до 91%) не позволяет построить изохрону даже по 19 точкам, возраст составляет 370 ± 10 млн. лет.

Анализ данных по монациту и ураниниту на диаграмме Th/Pb vs. U/Pb однозначно указывает на некорректность применения данного подхода для этих моноэлементных минералов-концентраторов Th или U с соотношением $\text{ThO}_2/\text{UO}_2 = 30/1$ и $1/100$, соответственно: вследствие “приуроченности” точек к осям Th/Pb или U/Pb ошибка при построении

изохроны достаточно высока, и Th/Pb- или U/Pb-возраст оценивается лишь чисто качественно.

Установлено, что в исследуемом торите содержание UO_2 варьирует от 7 до 9, ThO_2 – от 71 до 75 и PbO – в пределах 1 мас. %; для него получены датировки в 295–300 млн. лет, погрешность – 4–12%.

Установлено, что в исследуемом торианите содержание UO_2 варьирует от 29 до 35, ThO_2 – от 43 до 48 и PbO – в пределах 2 мас. %; для них получены датировки порядка 350 млн. лет, погрешность 4–12% [1].

ВЫВОДЫ

На основе анализа временной эволюции модельной U-Th-Pb-системы (модельных конкордантных/дискордантных данных) рассмотрены вопросы обработки результатов в рамках четырех подходов [7, 12–14]; проанализированы проблемы повышения воспроизводимости, объективности анализа с возможностью отбраковки недостоверных результатов, сформулированы условия, при которых могут быть получены корректные возрастные определения. Показано, что для корректной датировки при обработке данных необходим комплексный подход, включающий все четыре различных методики об-счета и сравнения получаемых возрастов. Для ряда **Th-U-минералов (монацитов, уранинитов, торитов и торианитов)** из различных геологических объектов Урала (магматических, метаморфических и других типов пород) выполнено элементное картирование, изучен химический состав и проведено их датирование.

Авторы признательны В.В. Мурзину, Т.А. Осиповой, К.С. Иванову, Ю.В. Ерохину (ИГГ УрО РАН), В.А. Попову и В.И. Поповой (ИМин УрО РАН) за образцы для исследований.

Работа выполнена в рамках программ в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. НИР по теме: “Геохимия, микроструктура и радиационные явления в минералах-концентраторах радиоактивных элементов как основа для петрогенетических, геохронологических и материаловедческих приложений” (госконтракт № 02.740.11.0727), а также Президиума РАН № 23 “Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов”, № 20 “Создание и совершенствование методов химического анализа”, а также в рамках программы УрО РАН “Состав, структура и физика радиационно-термических эффектов в фосфатных и силикатных минералах и стеклах как основа для геохронологических построений и создания материалов для утилизации высокоактивных долгоживущих радионуклидов” при поддержке гранта РФФИ № 09–05–00513.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерохин Ю.В., Хиллер В.В.* Торианит из золотоносных карбонатных пород Карабашского гипербазитового массива // Уральская минералогическая школа – 2009. Под знаком халькофильных элементов. Материалы конференции. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 98–100.
2. *Конилов А.Н., Романенко И.М., Филиппов М.Н., Петров Д.Б.* Возможности геохронологии монацитов Th-U-Pb методом по данным рентгеноспектрального микроанализа // Аналитика России-2004: тез. докл. конф. М. 2004. С. 265–266.
3. Минералогия пегматитов Ильменских гор. Минералогический альманах. 2006. Т. 9.
4. *Фор Г.* Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 589 с.
5. *Хиллер В.В.* Количественный химический анализ монацитов на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100 // Ежегодник-2008. Труды ИГГ УрО РАН. Вып. 156. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2008. С. 344–349.
6. *Хиллер В.В., Ерохин Ю.В.* Химическое датирование уранинита из гранитоидов фундамента Шаимского района (Западная Сибирь) // Тез. Док. XVI Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твёрдых тел. Черноголовка: ИПТМ РАН, 2009. С. 74.
7. *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.
8. *Dahl P.S., Hamilton M.A., Jercinovic M.J., et al.* Comparative isotopic and chemical geochronometry of monazite, with implications for U-Th-Pb dating by electron microprobe: An example from metamorphic rocks of the eastern Wyoming Craton (USA) // Am. Min. 2005. V. 90. P. 619–638.
9. *Jercinovic M.J., Williams M.L.* Analytical perils (and progress) in electron microprobe trace element analysis applied to geochronology: background acquisition, interferences, and beam irradiation effects // Am. Min. 2005. V. 90. P. 526–546.
10. <http://www.nendai.nagoya-u.ac.jp/gsd/CHIME/>
11. *Ludwig K.R.* Users manual for ISOPLOT/EX, version 2. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Spec. Pub. 1a. 1999. Berkeley Geochronology Center Special Publication № 4. 2008.
12. *Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., et al.* Electron microprobe dating of monazite // Chem. Geology. 1996. V. 131. P. 37–53.
13. *Rhede D., Wendt I., Fyfe H.J.* A three-dimensional method for calculating independent chemical U/Pb- and Th/Pb-ages of accessory minerals // Chem. Geol. 1996. V. 30. P. 247–253.
14. *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 // Sedimentary Geology. 1991. V. 75. P. 141–147.
15. *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.
16. *Williams M. L., Jercinovic M. J., Terry M. P.* Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe: Deconvoluting multistage tectonic histories // Geology. 1999. V. 27. № 11. P. 1023–1026.
17. *York D.* Least-squares fitting of a straight line // Can. J. Phys. 1966. 44. V. P. 1079–1086.