

ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ U-Th-Pb-СИСТЕМЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО ДАТИРОВАНИЯ U-Th-СОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ

CHAPTER 6. SIMULATION OF U-Th-Pb SYSTEM EVOLUTION: THE BASIS FOR CHEMICAL MICROPROBE DATING OF U-Th-BEARING MINERALS

Известно несколько различных процедур химического датирования минералов и авторских программных продуктов для расчета возраста и его погрешности (см. например, Suzuki et al., 1991; <http://www.nendai.nagoya-u.ac.jp/gsd/CHIME/>; Cocherie, Albarede, 2001). В связи с этим актуальна задача сопоставления и согласования получающихся датировок. Предпринимались попытки ее решения на основе анализа данных для минералов из различных геологических объектов. Представляется, что этот подход, основанный на переборе случайных образцов с неопределенной эволюцией их U-Th-Pb-системы, носит частный характер и малопродуктивен: он не может исчерпать все возможные случаи смешения разновозрастных подсистем, привноса-потери Pb и др. Представляется перспективным использовать для решения этого вопроса результаты вычислительного эксперимента по моделированию эволюции статистической U-Th-Pb-системы с различными параметрами.

Цель настоящего раздела – совершенствование процедуры обсчета аналитических геохронологических данных с использованием авторской программы и обоснование нового подхода на основе вычислительного эксперимента по эволюции статистической модельной U-Th-Pb-системы минералов при варьировании ее основных характеристик.

Для достижения поставленной цели выполнено решение двух геохронологических задач – «прямой», состоящей в моделировании эволюции системы от 0 до T_m со случайными начальными содержаниями UO_2^n , ThO_2^n , PbO^n и возможной потерей изотопов Pb, и «обратной», состоящей в восстановлении значения возраста системы по конечным содержаниям UO_2^k , ThO_2^k и PbO^k , определенным с некоторой погрешностью $\Delta Th/Th$, $\Delta U/U$ и $\Delta Pb/Pb$. Все величины концентраций, потерь и привноса элементов моделировались статистически методом Монте-Карло, их распределение задавалось как нормальное с заданным математическим ожиданием и дисперсией.

6.1. Решение «прямой» геохронологической задачи (моделирование эволюции U-Th-Pb-системы)*

На первом этапе моделирования эволюции U-Th-Pb-системы принимались некие произвольные значения для начальных содержаний ThO_2^n , UO_2^n , PbO^n (рис. 6.1), соответствующие случаю как моноэлементной ториевой или урановой системы (при соотношении $ThO_2^n:UO_2^n=10:0$ и $0:10$), так и ряду промежуточных составов, когда это соотношение варьирует от 10:1 до 1:10. Служит

часть корреляции содержаний UO_2^n , ThO_2^n не рассматривался, т.е. система моделировала только те минералы, в которых изоморфные замещения U и Th реализуются независимо. Предполагалось наличие начального нерадиогенного Pb ($PbO^n \neq 0$). Вариации дисперсии начальных содержаний UO_2^n , ThO_2^n , PbO^n в системе имитировали различную неоднородность состава минералов (СКО=5–30 отн. %), а количество ее статистических (случайных) реализаций (N) – число

*) Настоящий раздел работы выполнен совместно с Поротниковым А.В.

точечных микронзондовых анализов состава минерала ($N=10-250$). Далее в соответствии с уравнениями радиационного распада изотопов рассчитывались конечные содержания PbO^k , UO_2^k и ThO_2^k при некоторых фиксированных (модельных) значениях возраста $t = T_M$ в интервале от 200 до 2000 млн. лет для обеих U-Pb- и Th-Pb-подсистем:

$$Pb^K = Pb^H + \alpha_1 Th^H \cdot \{ \exp(^{232}\lambda t) - 1 \} \cdot (208/232) + \alpha_2 0.0072 U^H \cdot \{ \exp(^{235}\lambda t) - 1 \} \cdot (207/238.04) + \alpha_2 0.9928 \cdot U^H \{ \exp(^{238}\lambda t) - 1 \} \cdot (206/238.04),$$

$$Th^K = Th^H \cdot \exp(-^{232}\lambda t),$$

$$U^K = ^{235}U^H \cdot \exp(-^{235}\lambda t) + ^{238}U^H \cdot \exp(-^{238}\lambda t),$$

здесь α_{1-2} – некоторые численные параметры, меньшие 1, характеризующие степень «открытости» системы или эпизодические диффузионные потери изотопов радиогенного Pb, в том числе непропорциональные для двух изотопных систем (^{208}Pb и ^{207}Pb - ^{206}Pb) в результате единичного термального события, согласно известной модели Везервилла (Фор, 1989). Заметим, что в силу различия констант распада $^{235}\lambda$ и $^{238}\lambda$ соотношение изотопов $^{235}U/^{238}U$ достаточно значительно увеличивается с увеличением возраста системы от начального, равного 137.88, тем не менее, данный факт, как правило, игнорируется при расчете возраста (Cocherie, Albaredo, 2001; Montel et al., 1996; Suzuki et al., 1991), но он может, как показано ниже, приводить к занижению значений возраста, особенно в высокоурановой системе.

Значения дисперсии содержаний UO_2^H и ThO_2^H , имитирующие композиционную неоднородность зерна минерала, принимались лежащими в интервале от 5 до 30 отн. %, при этом как начальные отношения этих элементов UO_2^H/ThO_2^H , так и конечные в момент времени T_M существенно «размыты» статистикой для различных реализаций системы (рис. 6.1). Относительные погрешности определения $\Delta U/U$, $\Delta Th/Th$ и $\Delta Pb/Pb$ конечных содержаний («аппаратные» погрешности измерений концентраций) принимались лежащими в интервале от 1 до 10 %, что стандартно реализуется при микронзондовом анализе U-Th-содержащих минералов различного возраста и с различным содержанием радиоактивных элементов. Как правило, вклад $\Delta U/U$ и $\Delta Th/Th$ в погрешность датировки менее значимый,

Содержание элемента

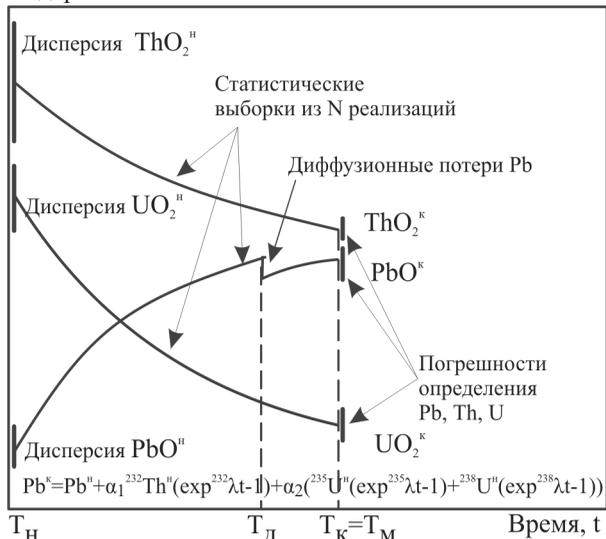


Рис. 6.1. Схема эволюции открытой модельной ураноториевой системы от момента времени T_n до $T_k=T_m$ с $ThO_2^H:UO_2^H=10:6$, начальным нерадиогенным Pb ($PbO^H \neq 0$) и диффузионными потерями радиогенного в момент T_d . α_{1-2} – параметры, характеризующие диффузионные потери изотопов радиогенного Pb

Fig. 6.1. The evolution of an open model of U-Th-system from T_n to T_m time points. $ThO_2^H:UO_2^H=10:6$, initial nonradioactive $PbO^H \neq 0$, T_d – diffusive loss moment

чем $\Delta Pb/Pb$, поскольку содержание материнских изотопов выше, чем дочернего, практически во всех случаях в рассмотренном нами возрастном интервале 200–2000 млн. лет.

Таким образом, в результате моделировалась некая статистическая реализация (выборка) конкордантных или дискордантных данных. Основное внимание в работе уделено анализу реперной высокоториевой модельной закрытой (конкордантной) системы с возрастом $T_M=200$ млн. лет (далее «система-200») с содержанием $ThO_2^H=10$, $UO_2^H=1$, $PbO^H=0$ мас. %, $SKO(UO_2^H)=SKO(ThO_2^H)=30$ %, при $N=100$, относительной погрешности определения содержания $\Delta Th/Th=\Delta U/U=\Delta Pb/Pb=1$ % и без диффузионных потерь радиогенного Pb. Приведенные численные характеристики системы-200 близки к таковым в минерале монаците – традиционном объекте химического датирования. На илл. 44, прил. II представлены типичные числовые параметры системы-200 в проекции из трехмерной системы координат UO_2 - ThO_2 - PbO на координатные плоскости, а также графическая визуализация («элементное картирование» по UO_2^k

и ThO_2^k в квадрате 10×10) для ста статистических реализаций системы; видно, что корреляции содержаний U и Th не фиксируется. В ряде рассмотренных ниже примеров варьировались отдельные параметры модельной системы-200: возраст, дисперсия содержаний, погрешности определения $\Delta\text{Th}/\text{Th}$, $\Delta\text{U}/\text{U}$, $\Delta\text{Pb}/\text{Pb}$ и др.

Дискордантность в системе моделировалась либо суперпозицией двух близких конкордантных систем, либо эпизодическими (одномоментными) потерями радиогенного Pb, в том числе непропорциональными для ^{208}Pb и ^{207}Pb - ^{206}Pb (проблема фракционирования изотопов Pb является предметом острых дискуссий в геохронологии, см. например, (Mattinson, 2005)).

В рамках первого подхода были изучены следующие «бимодальные» системы: система- $(200+202)$, $(200+205)$, $(200+210)$, $(200+220)$, моделирующие практически важный случай «смещения» аналитических микрозондовых результатов по зернам минерала, гетерогенного по возрасту. В рамках второго подхода имитировалась диффузия радиогенного Pb из кристалла или его отдельных зон при температурах выше закрытия U-Pb и/или Th-Pb-системы. Случай добавки или потери материнских изотопов U и Th нами не рассматривался. Заметим, что в различных кристаллических структурах мине-

ралов 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 . Напомним, что изотоп ^{206}Pb образуется в результате цепочки распада, сопровождаемой выделением большего, чем при образовании изотопа ^{208}Pb , числа α -частиц; последние оставляют более «длинные» радиационные следы, в результате чего изотоп ^{206}Pb находится в более развитой системе каналов в структуре минерала и более доступен для флюида и химической абразии (Mattinson, 1997, 2000; Nasdala, 2001, 2002). Последняя вызывает образование двух типов Pb, возникающих в результате распада U и Th, и появление дискордантных возрастных данных (см. например, (Cocherie, Albarede, 2001)). В «диффузионном приближении» в рамках закона Фика потери элемента в системе (в каждой точке минерала) пропорциональны его локальному содержанию в ней: $\text{PbO}_d^k = \alpha \cdot \text{PbO}^k$, где α – некоторый параметр, меньший 1, а индекс «д» соответствует диффузионно-контролируемому содержанию Pb. Заметим, что имеющиеся экспериментальные данные о неравенстве значений U/Pb и Th/Pb-возраста указывают на то, что изотопные U-Pb (и/или Th-Pb) системы не оставались закрытыми, т.е. в диффузионной модели $\alpha_1(^{208}\text{Pb}) \neq \alpha_2(^{207}\text{Pb}, ^{206}\text{Pb})$.

6.2. Решение «обратной» геохронологической задачи (методы датирования модельной U-Th-Pb-системы)

На втором этапе по содержанию элементов UO_2^k , ThO_2^k и PbO^k (или PbO_d^k), соответствующему времени T_m и определенному с некоторыми погрешностями (1–10 %) для N статистических реализаций системы ($N=10$ –250), рассчитывалось восемь (I–VIII) значений ее возраста $T_p \pm \Delta T_p$ (индекс «р» соответствует расчетному) с использованием оригинальной программы (Вотяков и др., 2010), в основу которой положен алгоритм ортогональной регрессии (York, 1966), и модифицированной программы Isoplot 3.66 (Ludwig, 1999) в рамках четырех различных процедур.

- Из единичной статистической реализации системы (точечное датирование по единичным значениям ThO_2^k , UO_2^k и PbO^k), следуя (Montel et al., 1996), при условии, что содержание нерадиогенного Pb пренебрежимо мало, с оценкой сред-

него значения U-Th-Pb-возраста по выборке из N точек и средне-взвешенного значения по возрастным гистограммам (далее значения точечного возраста I–II, соответственно).

- Из ThO_2^* -PbO-изохроны для высокотермической системы (или UO_2^* -PbO-изохроны – для высокоурановой), где Th* и U* определены выше, с оценкой нерадиогенного Pb при условии его фиксированного содержания во всех статистических реализациях системы (точках минерала), следуя (Suzuki, Kato, 2008), далее значения III изохронного Th*/Pb- или U*/Pb-возраста.

- Из U/Pb-Th/Pb-изохроны с использованием представления аналитических данных на соответствующей диаграмме, следуя (Cocherie, Albarede, 2001), с оценкой изохронного Th/Pb- и U/Pb-возраста, а также средне-взвешенного значения, определенного по координатам средне-

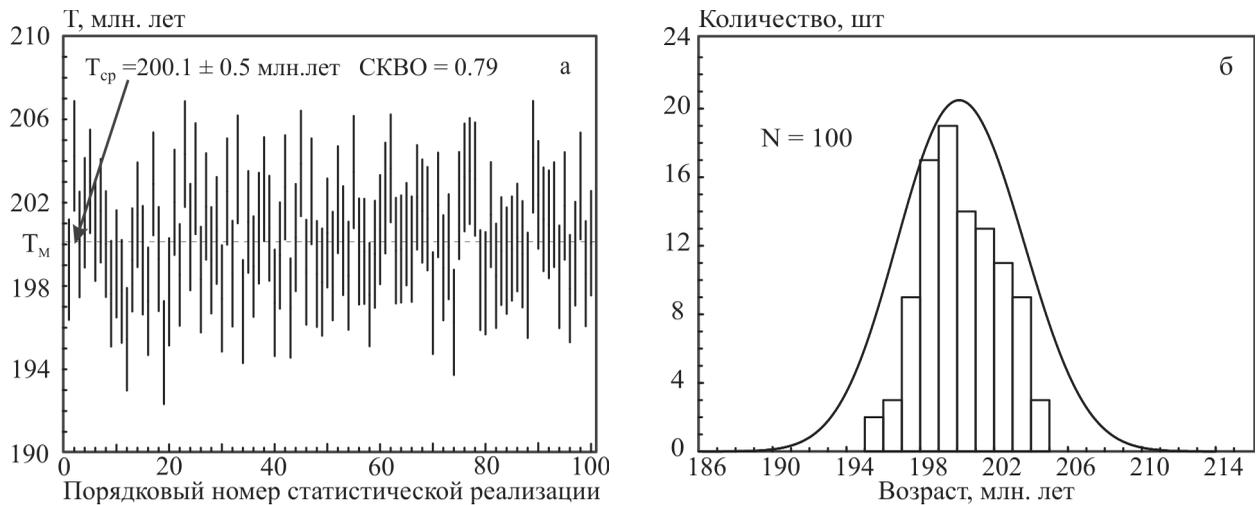


Рис. 6.2. Вариации значений точечного возраста (а) и гистограмма их распределения (б) для модельной системы-200

Fig. 6.2. Variations of the age values, and a histogram of their distribution for the model system-200 (а) and weighted-histogram representation of the data (б)

взвешенной точки на линии регрессии (изохроне) для выборки из N точек (далее значения возраста IV–VI).

• Из $\text{ThO}_2\text{-UO}_2\text{-PbO}$ -изохронной плоскости в трёхмерном пространстве (Rhede et al., 1996) с оценкой нерадиоγενного Pb при условии его фиксированного содержания для всех статистических реализаций системы, следуя (Rhede et al., 1996) (далее значения VII–VIII Th/Pb- и U/Pb-возраста).

В последующем проводилось сопоставление и анализ полученных перечисленных восьми (I–VIII) значений возраста, что открывает возможность их разбраковки и усреднения. В качестве показателя корректности датирования системы нами предложен параметр δ , равный различию ее модельного и расчетного возраста $(T_p - T_m)/T_m \cdot 100\%$; исходя из практических требований датирования реальных геологических объектов условие корректности оценки возраста определено нами как $|\delta| < 5\%$.

Таблица 6.1. Результаты моделирования состава 10 статистических реализаций системы-200 и соответствующие им значения точечного возраста и его погрешности

Table 6.1. Simulated $\text{ThO}_2\text{-UO}_2\text{-PbO}$ -compositions for 10 statistic realizations of the model system-200 and applicable values of Th-U-Pb-ages I

№	ThO_2 , мас. %	$\sigma(\text{ThO}_2)$	UO_2 , мас. %	$\sigma(\text{UO}_2)$	PbO , мас. %	$\sigma(\text{PbO})$	T_p^* , млн. лет	ΔT_p^* , млн. лет
1	5.55	0.056	1.44	0.014	0.09	0.0009	198.8	2.4
2	15.40	0.154	1.17	0.012	0.17	0.0017	204.2	2.6
3	9.98	0.100	0.99	0.010	0.11	0.0011	200.0	2.5
4	15.00	0.150	0.90	0.009	0.15	0.0015	201.5	2.6
5	6.84	0.068	1.28	0.013	0.09	0.0009	203.0	2.5
6	6.04	0.060	1.43	0.014	0.09	0.0009	200.7	2.4
7	8.15	0.082	1.31	0.013	0.11	0.0011	201.6	2.5
8	13.00	0.130	1.27	0.013	0.14	0.0014	200.0	2.5
9	9.37	0.094	0.75	0.007	0.10	0.0010	197.6	2.5
10	12.00	0.120	0.86	0.009	0.12	0.0012	199.1	2.6

Примечание. * расчеты T_p и ΔT_p выполнены с использованием программы фирмы Самеса, согласно которой:

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

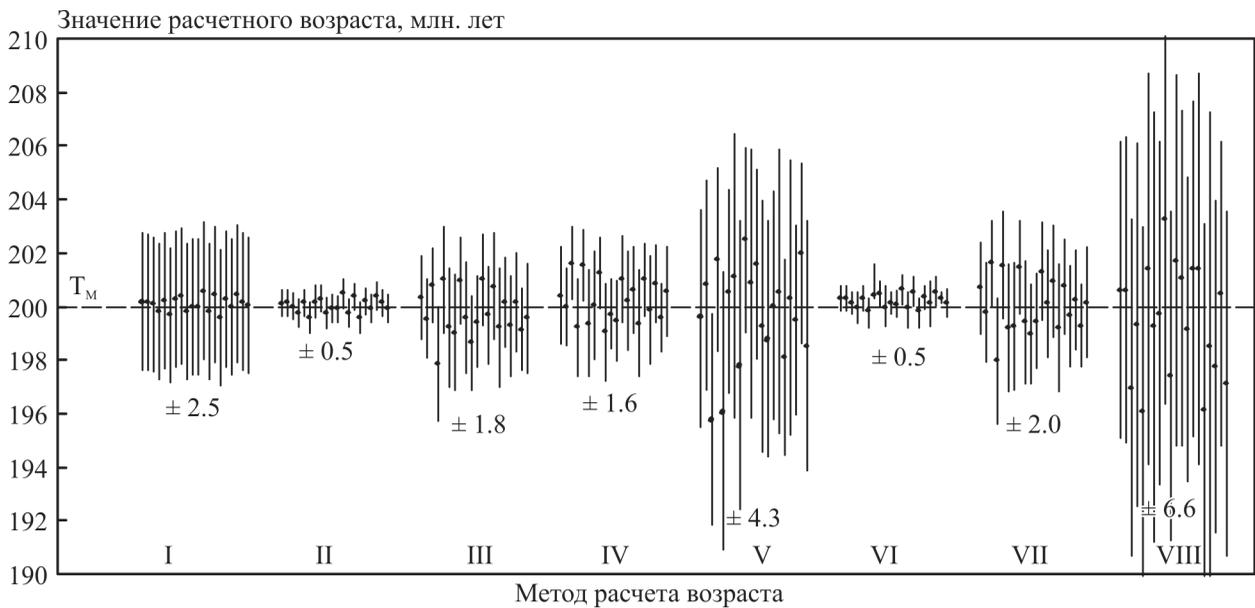


Рис. 6.3. Вариации расчетных значений возраста для 20 выборок модельной системы-200 по 100 статистических реализаций в каждой. Числа на диаграмме – значения усредненной погрешности определения возраста $\langle \Delta T_p \rangle$, млн. лет. Здесь и далее на рис. 6.3, 6.7, 6.9, 6.11, 6.13 и в табл. III–XI (Приложение I): I, II – средний и средне-взвешенный неизохронный Th-U-Pb-возраст, рассчитанный по единичным (точечным) статистическим реализациям состава системы; III – изохронный Th*/Pb-возраст; IV–V – Th/Pb, U/Pb-возраст, определенный по Th/Pb-U/Pb-изохроне, и VI – средне-взвешенное значение, определенное по координатам средне-взвешенной точки на линии регрессии (изохроне); VII–VIII – Th/Pb и U/Pb-возраст, определенный по ThO₂-PbO-UO₂-изохронной плоскости

Fig. 6.3. Estimated age values for 20 samples of the model system-200, with 100 statistical realizations in each sample. The numbers on the diagram are the values of average age estimation errors $\langle \Delta T_p \rangle$, Ma

Датирование из единичной статистической реализации системы (расчет возраста I–II).

В табл. 6.1 представлены результаты серии расчетов возраста из единичной статистической реализации для модельной системы-200, а на рис. 6.2 – значения точечного возраста и его погрешности для серии из ста статистических реализаций системы-200. Из рис. 6.2 видно, что на гистограмме распределения точечных датировок выделяется один максимум, который соответствует возрасту данной гомогенной закрытой системы; последний в пределах погрешности согласуется с величиной T_m .

Для приведенной на рис. 6.2 выборки статистических реализаций системы значения точечного возраста I (среднее значение U-Th-Pb-возраста по выборке из 100 точек) и II (средне-взвешенное значение возраста) составляют 200.1 ± 2.5 и 200.1 ± 0.5 млн. лет (СКВО=0.79). Очевидно, что для другой случайной выборки эти значения могут несколько отличаться. С целью оценки вариаций расчетных величин T_p и ΔT_p по разным выборкам нами выполнено моделирование 2000 статистических реализаций для сис-

темы-200, разделенных на 20 выборок по 100 реализаций в каждой. Полученные значения точечного возраста I и II, его погрешности ΔT_p и величины СКВО представлены в табл. III и на рис. 6.3. Видно, что все значения точечного возраста I и II в пределах погрешности согласуется с величиной T_m , но при этом погрешности их определения значительно различаются: величины $\langle \Delta T_p \rangle$, усредненные по 20 выборкам для возраста I и II, составляют ± 2.5 и ± 0.5 млн. лет, соответственно; представляется, что эти значения можно рассматривать, как достаточно объективные численные показатели «качества» процедуры точечного датирования модельной системы-200.

Датирование по ThO₂*-PbO-изохроне (расчет возраста III). В табл. 6.2 и на диаграмме (ThO₂*-PbO) (рис. 6.4) представлены типичные статистические результаты для модельной системы-200; данные укладываются на изохрону со значением возраста III в 199.5 ± 1.5 млн. лет (СКВО=0.78), проходящую практически через начало координат, что вполне очевидно, поскольку начальное содержание PbO^{II} в системе-200 принято нулевым.

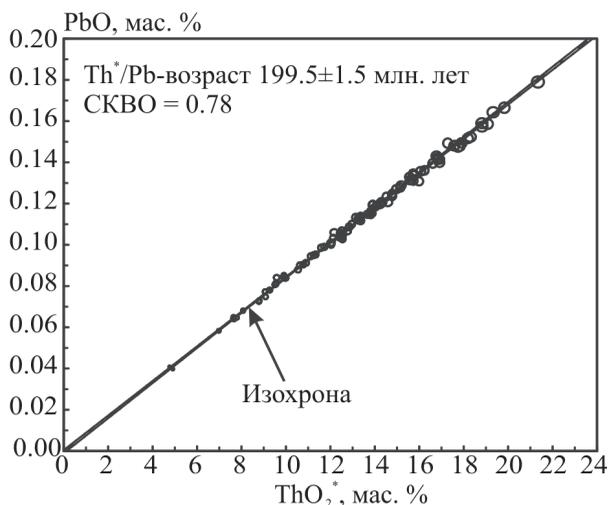


Рис. 6.4. ThO_2^* -PbO-данные для модельной системы-200. Здесь и далее на рис. 6.4, 6.5, 6.8, 6.10, 6.15, 6.17, 6.19 эллипс соответствует значению погрешности 2σ , штрих-пунктир – линии регрессии с двумя симметричными гиперболами, фиксирующими погрешности

Fig. 6.4. ThO_2^* vs PbO plot for the model system-200

В табл. III и на рис. 6.3 представлены вариации расчетных значений возраста III для 20 выборок модельной системы-200. Все значения возраста III в пределах погрешности согласуются с величиной T_M ; усредненное по выборкам значение погрешности $\langle \Delta T_p \rangle$ составляет ± 1.8 млн. лет, что сопоставимо с таковым для точечного возраста I, рассчитанного по единичным статистическим реализациям состава системы.

Датирование по Th/Pb-U/Pb-изохроне (расчет возраста IV–VI). В табл. 6.2 и на диаграмме

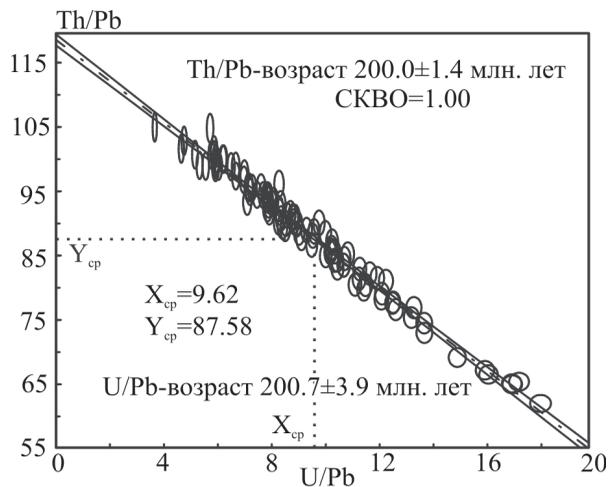


Рис. 6.5. Th/Pb-U/Pb-данные для модельной системы-200. Здесь и далее X_{cp} и Y_{cp} – координаты средне-взвешенной точки на линии регрессии

Fig. 6.5. Th/Pb vs U/Pb plot for the model system-200

Fig. 6.5. Th/Pb vs U/Pb plot for the model system-200

(Th/Pb-U/Pb) (рис. 6.5) представлены типичные статистические результаты для модельной системы-200; данные укладываются на изохрону; при этом значения Th/Pb и U/Pb-возраста IV–V рассчитываются независимо, как координаты точек пересечения линии регрессии с осями координат; для системы-200 они составляют 200.0 ± 1.4 и 200.7 ± 3.9 млн. лет (СКВО=1.00). Средне-взвешенное значение возраста VI, определенное по координатам средне-взвешенной точки с координатами X_{cp} и Y_{cp} на линии регрессии (изохроне), составляет 200.2 ± 0.4 млн. лет.

Таблица 6.2. Результаты моделирования состава 10 статистических реализаций модельной системы-200

Table 6.2. Simulated ThO_2 - UO_2 -PbO-compositions for 10 statistic realizations of the model system-200

№	ThO_2^* , %	$\sigma(\text{ThO}_2^*)$	PbO, мас. %	$\sigma(\text{PbO})$	U/Pb	$\sigma(\text{U/Pb})$	Th/Pb	$\sigma(\text{Th/Pb})$	ρ
1	12.53	0.11	0.10	0.0010	5.36	0.08	102.49	1.45	0.0018
2	17.57	0.15	0.15	0.0015	7.24	0.10	95.34	1.35	0.0014
3	12.84	0.10	0.11	0.0011	11.64	0.16	80.57	1.14	0.0011
4	7.64	0.06	0.06	0.0006	11.01	0.16	82.08	1.16	0.0011
5	13.68	0.11	0.11	0.0011	7.30	0.10	95.56	1.35	0.0014
6	8.07	0.06	0.07	0.0007	14.55	0.21	71.58	1.01	0.0010
7	11.34	0.08	0.10	0.0010	14.05	0.20	73.61	1.04	0.0010
8	16.92	0.14	0.14	0.0014	8.29	0.12	94.14	1.33	0.0013
9	10.78	0.08	0.09	0.0009	11.07	0.16	83.43	1.18	0.0011
10	11.59	0.09	0.10	0.0010	9.22	0.13	87.72	1.24	0.0012

Примечание. ρ (Rho) – величина корреляции между погрешностями определения отношений U/Pb- и Th/Pb

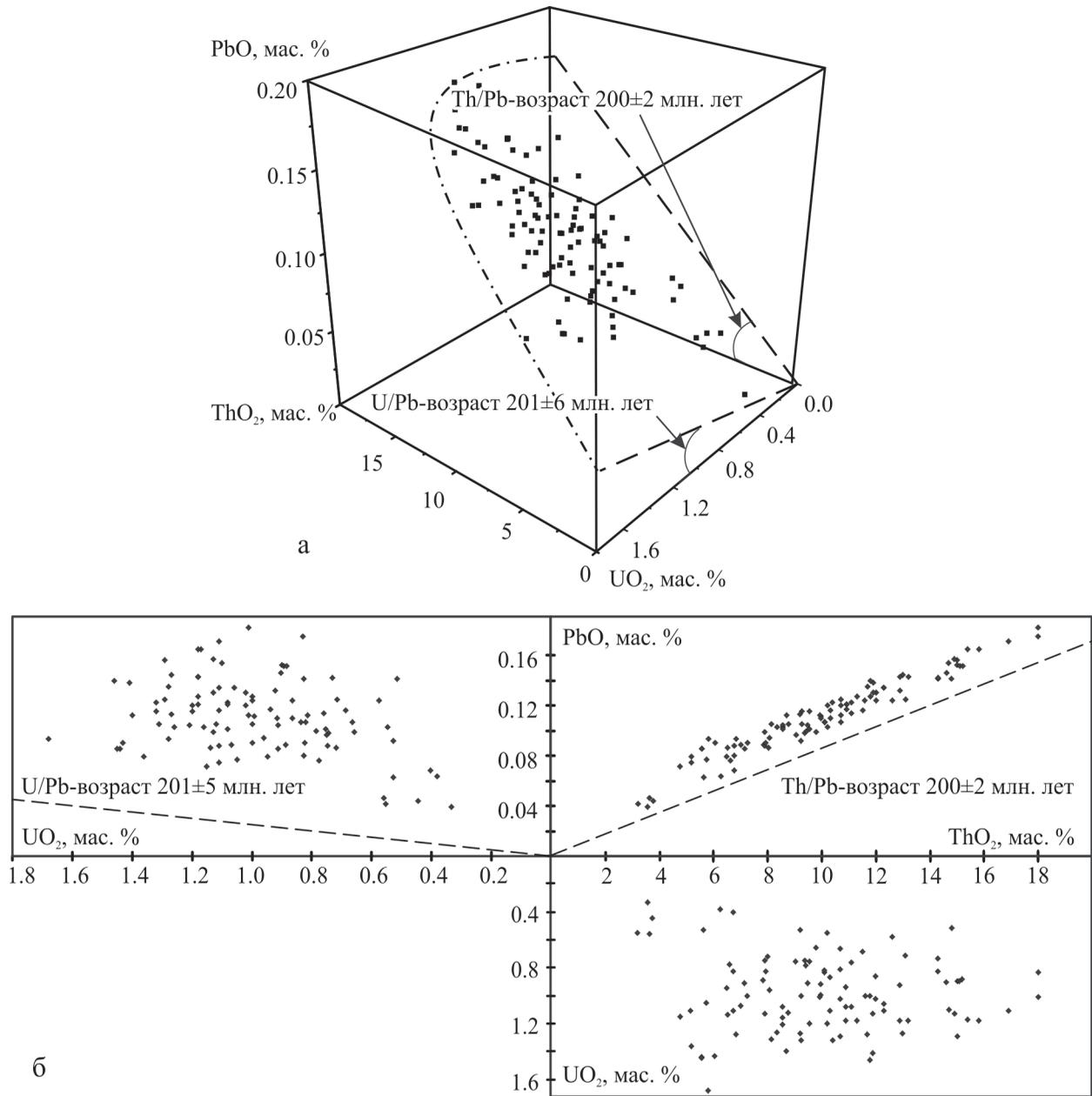


Рис. 6.6. ThO₂-UO₂-PbO-данные для модельной системы-200 (а) и их проекции на координатные плоскости (б). Штрих-пунктир – плоскость регрессии; пунктир – ее пересечения с координатными плоскостями

Fig. 6.6. ThO₂-UO₂-PbO plot for the model system-200 (a) and its projection on the coordinate plane (б)

В табл. III и на рис. 6.3 представлены вариации расчетных значений возраста IV–VI для 20 статистических выборок системы-200. Все значения в пределах погрешности согласуются с величиной T_m , но при этом усредненные погрешности их определения $\langle \Delta T_p \rangle$ достаточно значимо различаются: для возраста IV погрешность составляет порядка ± 1.6 млн. лет и сопоставима с таковой для и возраста I и III; напро-

тив, для возраста V она существенно выше – порядка ± 4.3 млн. лет, что вполне понятно для высокотермической системы, для которой точки на Th/Pb-U/Pb-диаграмме примыкают к вертикальной Th/Pb-оси. Погрешность определения средне-взвешенного возраста VI – наиболее низкая (порядка ± 0.5 млн. лет) и сопоставима с таковой для средне-взвешенного точечного возраста II.

Датирование по $\text{ThO}_2\text{-UO}_2\text{-PbO}$ -изохронной плоскости (расчет возраста VII–VIII). В табл. 6.1 и на трёхмерной $\text{ThO}_2\text{-UO}_2\text{-PbO}$ -диаграмме (рис. 6.6) представлены типичные статистические результаты для модельной системы-200; данные укладываются на изохронную плоскость с уравнением $\text{PbO}^k = a\text{ThO}_2^k + b + c\text{UO}_2^k$, где $a = 0.00842 \pm 0.00007$, $c = 0.0271 \pm 0.0007$ и $b = 0.00013 \pm 0.00069$ (СКВО=3.2), проходящую практически через начало координат. Из углов наклона линий пересечения плоскости регрессии с координатными плоскостями $\text{ThO}_2\text{-PbO}$ и $\text{UO}_2\text{-PbO}$ определены значения возраста VII и VIII системы как 200 ± 2 и 201 ± 6 млн. лет, при этом содержание нерадиогенного Pb оценено как практически нулевое (0.0001 ± 0.0007 %).

В табл. III и на рис. 6.3 представлены вариации расчетных значений возраста VII–VIII для 20 выборок системы-200. Все значения возраста VII и VIII в пределах погрешности согласуются с величиной T_m , но при этом погрешности их опре-

деления $\langle \Delta T_p \rangle$ различаются достаточно значимо: для возраста VII погрешность составляет порядка ± 2.0 млн. лет и сопоставима с таковой для возраста III; напротив, для возраста VIII она существенно выше – порядка ± 6.6 млн. лет.

Кратко суммируя полученные результаты, отметим следующее. Для статистической модельной высокоториевой системы-200 минимальное значение погрешности порядка $\pm 0.5\text{--}0.6$ млн. лет реализуется при расчете средне-взвешенного возраста II и VI; погрешности определения точечного и возраста I, III, IV и VII сопоставимы между собой и составляют величину порядка ± 2 млн. лет; погрешности определения возраста V и VIII еще выше (порядка $\pm 4\text{--}6$ млн. лет). Процедура аппроксимации, поиска и визуального представления плоскости регрессии на трёхмерной $\text{ThO}_2\text{-UO}_2\text{-PbO}$ -диаграмме достаточно затруднительна, а получаемые при этом Th/Pb и U/Pb-датировки (значения возраста VII и VIII) характеризуется повышенной погрешностью.

6.3 Датирование модельной конкордантной системы

U-Th-содержащие минералы-геохронометры существенно различаются по химическому составу, размерам областей зерен, гомогенных по возрасту и т.д.; при этом химическое датирование выполняется как для «смешанных» ураново-ториевых минералов, в которых содержания этих элементов сопоставимы, так и для высокоториевых (высокоурановых) разностей, в том числе, и для квазимоноэлементных, в которых доминирует один из элементов. Весьма

значимо варьирует и дисперсия элементов по зернам минералов. В связи с этим актуальным представляется анализ влияния состава и соотношения содержаний U и Th для соответствующей модельной системы, а также дисперсии U и Th, возраста, погрешности определения элементов и статистики выборки данных (количества статистических реализаций системы). На практике последняя существенно зависит от размеров областей зерен, гомогенных по возрасту.

6.3.1. Анализ влияния состава модельной системы на ее датирование: моделирование высокоториевых и высокоурановых минералов

Проанализировано влияние соотношения материнских элементов (изотопов) в модельной системе-200 на качество ее датировки; рассмотрены случаи моноэлементной ториевой и урановой системы при соотношении $\text{ThO}_2^m:\text{UO}_2^m = 10:0$ и $0:10$, а также ряд промежуточных составов, когда это соотношение варьирует от $10:1$ до $1:10$. Полученные данные для значений расчетного возраста I–VIII системы-200 представлены в табл. IV и на рис. 6.7. Заметим, что процедура, развитая в работе (Suzuki et al., 1991) для расчета возраста III, предпо-

лагает, что в минерале-геохронометре соотношение материнских элементов удовлетворяет условию $\text{ThO}_2^m:\text{UO}_2^m \gg 1$ или $\ll 1$; другие использованные нами подходы для расчета не накладывают ограничений на соотношение материнских элементов в минерале.

Моноэлементная ториевая (урановая) система может быть датирована по точечным значениям ThO_2^k (или UO_2^k) и PbO^k , а также по $\text{ThO}_2^*\text{-PbO}$ - или $\text{UO}_2^*\text{-PbO}$ -изохронам при $\text{UO}_2^m = 0$ или $\text{ThO}_2^m = 0$, соответственно. Заметим, что Th/Pb-U/Pb-изохроны для моноэлемент-

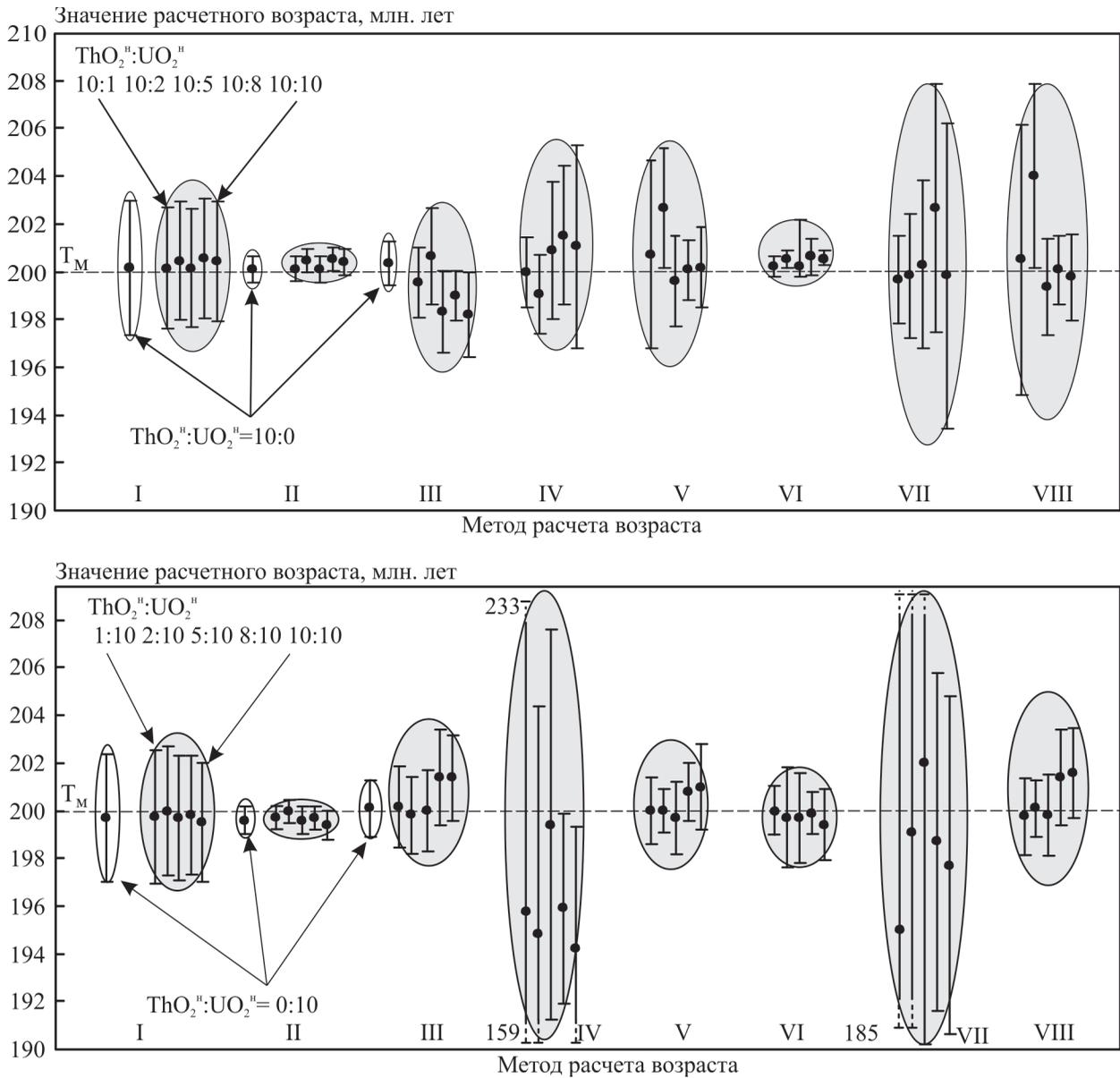


Рис. 6.7. Вариации расчетных значений возраста для модельной ториевой (а) и урановой (б) системы-200 при различных значениях соотношения ThO₂^н:UO₂^н=10:0, 10:1, 10:2, 10:5, 10:8, 10:10 (а) и 0:10, 1:10, 2:10, 5:10, 8:10, 10:10 (б). Незалитые овалы – моноэлементная ториевая и урановая системы. Здесь и далее числа на диаграмме – значения максимума (минимума) погрешности определения возраста, млн. лет.

Fig. 6.7. Calculated ages for the model system-200 with different values of ThO₂^н:UO₂^н-ratio

ных систем вырождаются в точки, расположенные на оси ординат или абсцисс, а трёхмерные ThO₂-UO₂-PbO-изохронные плоскости – в линии на координатных ThO₂-PbO- или UO₂-PbO-плоскостях. Как видно из табл. IV, все значения расчетного возраста I–III в моноэлементных системах в пределах погрешности совпадают со значением T_м; погрешности определения возраста I и III составляют 1–3 млн. лет, а возраста II – 0.5–0.7 млн. лет.

Ториевая система. Все рассчитанные значения возраста I–VIII системы-200 при соотношении ThO₂^н:UO₂^н=10:1–10:8, удовлетворительно согласуются между собой и с T_м. При этом значения возраста I, II и VI с увеличением доли UO₂^н в системе практически не отклоняются от T_м, и их погрешность не изменяется. Напротив, значение возраста III несколько уменьшается с увеличением доли UO₂^н, а остальные значения IV, V, VII и VIII изменяются нерегулярно; при

этом погрешность определения IV и VII возрастает, а V и VIII уменьшается вследствие того, что точки на Th/Pb-U/Pb- и UO_2 -ThO₂-PbO-диаграммах распределяются более равномерно.

Урановая система. Несмотря на существенное различие временных констант распада материнских изотопов ²³²Th и ²³⁵U, ²³⁸U, результаты датировок для урановой и ториевой системы-200 во многом подобны. Значения расчетного возраста I–VIII урановой системы-200 при соотношении $ThO_2^{IV}:UO_2^{IV}=1:10-8:10$ хорошо согласуются между собой и с величиной T_m . Заметим, что удовлетворительные датировки реализуются только при использовании программных продуктов, в которых отношение изотопов ²³⁵U/²³⁸U принято зависящим от времени эволюции системы. Если это отношение принимается не зависящим от времени и равным 137.88, то все значения расчетного возраста несколько занижены (на 1–2 млн. лет) относительно T_m . Таким образом, приближение о постоянстве во времени отношения ²³⁵U/²³⁸U является достаточно грубым, приводящим к значительным погрешностям оценки возраста, тем не менее, оно используется во всех известных нам версиях программ для химического датирования минералов (см. например, <http://www.nendai.nagoya-u.ac.jp/gsd/CHIME/>). Следует отметить, что для урановой системы-200 значения возраста IV и VII определяются с аномально высокой погрешностью; при этом для ториевой системы значения расчетного возраста V и VIII определяются с существенно меньшей погрешностью (см. рис. 6.7, а, б).

Уран-ториевая система с сопоставимыми содержаниями может реализоваться на практике для некоторых силикатов высокозарядных катионов циркония, титана и др. Результаты моделирования системы-200 при соотношении $ThO_2^{IV}:UO_2^{IV}=10:10$ представлены на рис. 6.7 (а, б); при этом расчет значения возраста III проводился

6.3.2. Анализ влияния возраста модельной системы на ее датирование

Проанализировано влияние на качество датировки высокоториевой системы вариаций значения ее модельного возраста в интервале от 200 до 2000 млн. лет. Выбор пределов возрастного интервала обусловлен следующим: химическое датирование минерала монацита, наиболее широко используемого геохронометра, как правило, проводится для проб с возрастом, лежащим

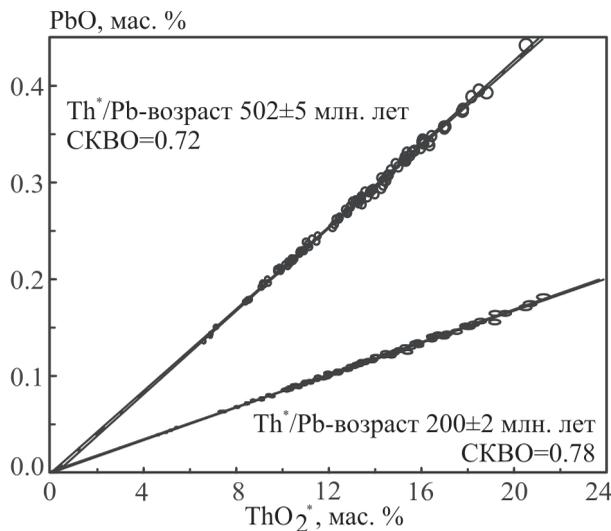


Рис. 6.8. ThO₂* PbO -данные для модельных систем-200 и -500

Fig. 6.8. ThO₂* vs. PbO plot for the model system-200 and -500

с использованием как ThO₂*-PbO-, так и UO₂*-PbO-диаграмм; установлено, что оба полученных значения III близки между собой: Th*/Pb-возраст составляет 198.2±1.8 (СКВО=1.17) и U*/Pb-возраст – 198.1±1.5 млн. лет (СКВО=0.90). В целом, значения возраста I–VIII удовлетворительно согласуются между собой и с T_m в пределах погрешности их определения.

Представляется, что ThO₂*-PbO- или UO₂*-PbO-изохронные диаграммы могут быть использованы при датировании минералов не только с существенно различным содержанием U и Th, но и с близкими концентрациями. На Th/Pb-U/Pb-диаграмме точки, соответствующие уран-ториевой системе с сопоставимыми содержаниями, располагаются в ее центральной зоне (равноудалены от осей координат), что дает возможность определять значения как Th/Pb-, так и U/Pb-возраста с близкими и минимальными погрешностями.

в указанном интервале; его нижний предел обусловлен ограничением по чувствительности микрозондового анализа по Pb (Williams et al., 1999).

Полученные нами данные для значений возраста модельной системы-200, 300, 500, 1000, 1500, 2000 представлены в табл. V, а на рис. 6.8 – две типичные ThO₂*-PbO-изохроны для системы-200 и 500.

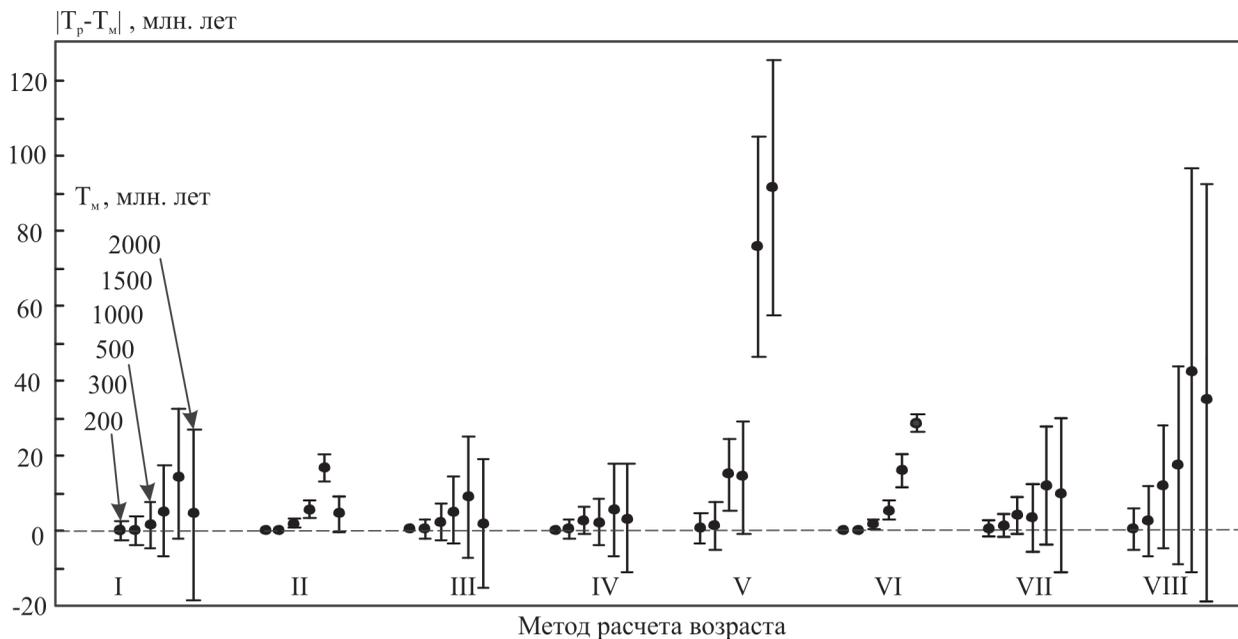


Рис. 6.9. Вариации отклонения расчетных значений возраста T_p от величины T_m для модельных систем с $T_m = 200, 300, 500, 1000, 1500$ и 2000 млн. лет.

Fig. 6.9. Calculated $(T_m - T_p)$ values for the model system-200, 300, 500, 1000, 1500 and 2000

Из данных, приведенных в табл. V и на рис. 6.9 видно, что увеличение возраста системы T_m приводит практически к пропорциональному увеличению абсолютной погрешности всех значений расчетного возраста; при этом относительная погрешность $\Delta T_p / T_p$ изменяется с ростом T_m незначимо и колеблется в интервале от 0.5 до 1.0 % для различных статистических выборок. Как было отмечено нами ранее, в программе расчета возраста отношение

изотопов $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ принималось равным 137.88 и не зависящим от длительности эволюции системы. Данное приближение приводит к занижению величины расчетного возраста I–II, V и VI–VIII по сравнению с модельным значением, т.е. к омоложению системы на 5–30 млн. лет и повышению погрешности датировки в особенности при $T_m = 1000$ млн. лет и выше; при этом значения Th/Pb-возраста III и IV менее значимо отклоняются от T_m .

6.3.3. Анализ влияния погрешности определения элементов на датирование модельной системы

Проанализировано влияние погрешности измерения элементов U, Th и Pb для модельной системы-200 на «качество» ее датировки; рассмотрены случаи, когда погрешности измерения варьируют в интервале от 1 до 10 %, что стандартно реализуется при микрозондовом анализе U-Th-содержащих минералов различного возраста и с различным содержанием материнских радиоактивных элементов. Отметим, что пониженные (до 1–3 %) значения погрешности $\Delta\text{Pb}/\text{Pb}$ соответствуют «нерядовому» эксперименту (Williams et al., 2006), но вполне достижимы как при исследовании «молодых» высококонцентрированных U-Th-минералов (торита и др.), так и при анализе низкоконцентрированных (мона-

цита, сфена и др.), но достаточно «древних» проб или при значительном (до сотен и тысяч секунд) увеличении длительности накопления импульсов от M_α -линии Pb.

Полученные нами данные для значений возраста модельной системы-200 при различных величинах относительной погрешности измерения $\Delta\text{U}/\text{U}$, $\Delta\text{Th}/\text{Th}$ и $\Delta\text{Pb}/\text{Pb}$ представлены в табл. VI, а на рис. 6.10 – три типичные Th/Pb-U/Pb-изохроны для системы-200 с различной относительной погрешностью $\Delta\text{Pb}/\text{Pb}$ – 1, 2 и 5 %.

Как наглядно видно из рис. 6.11, увеличение погрешности измерения Pb от 1–3 до 10 % приводит практически к пропорциональному увеличению погрешности датировки ΔT_p от единиц до

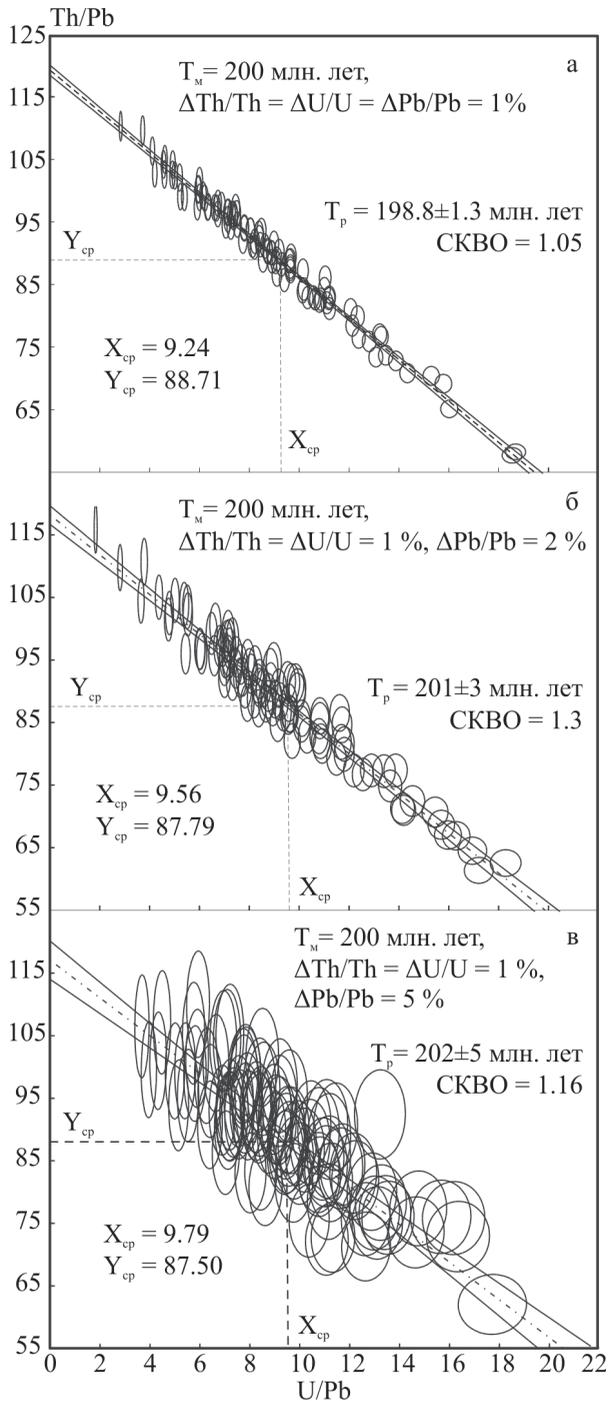


Рис. 6.10. Th/Pb-U/Pb-данные для модельной системы-200 с различной относительной погрешностью определения Pb: а-в – $\Delta\text{Pb}/\text{Pb} = 1, 2$ и 5%

Fig. 6.10. Th/Pb vs. U/Pb plot for the model system-200 with different Pb measurement errors

десятков млн. лет. Напротив, погрешность определения возраста с увеличением $\Delta U/U$ ($\Delta\text{Th}/\text{Th}$) растет менее значимо. Самые высокие погрешности фиксируются для значений U/Pb-возраста V и VIII. Можно констатировать, что только при

величине относительной погрешности $\Delta\text{Pb}/\text{Pb}$, не превышающей 5% , все значения расчетного возраста I–VIII удовлетворительно согласуются между собой и с величиной T_m .

6.3.4. Анализ влияния дисперсии содержания элементов и статистики выборки данных на датирование модельной системы

Проанализировано влияние на качество датировки дисперсии содержания элементов U и Th (композиционной гетерогенности) и статистики выборки в модельной системе-200; рассмотрены случаи, когда СКО ThO_2^{II} и UO_2^{II} варьируют в интервале от 5 до 30%, а число статистических реализаций системы – от 10 до 250. Принятые численные значения СКО и N достаточно типичны для практики датирования U-Th-содержащих минералов; заметим, что они достаточно значимо влияют на точность датировки. В работе (Williams et al., 2006) утверждалось, что количество аналитических точек N в каждой области полигенных монацитов определяется требованиями по погрешности определения возраста: в гомогенных областях погрешность менее 10 млн. лет может быть получена при $N=5-10$, что представляется достаточно спорным, поскольку авторами не принималась в рассмотрение композиционная гетерогенность этих областей.

Полученные нами данные для значений возраста модельной системы-200 при различных величинах дисперсии ThO_2^{II} и UO_2^{II} и числе статистических реализаций системы N представлены в табл. VII-VIII и на рис. 6.11.

Из рис. 6.11, б видно, что степень композиционной гетерогенности системы практически не влияет на погрешность возраста I, II и VI; напротив погрешность определения всех значений изохронного возраста (III–V и VII–VIII) значительно снижается с ростом дисперсии содержания U и Th. С практической точки зрения важен случай неравенства или существенного различия – при $\text{СКО}(\text{ThO}_2)/\text{СКО}(\text{UO}_2) \gg 1$ или $\ll 1$. Заметим, что в исследованной нами представительной выборке уральских монацитов дисперсия содержания ThO_2 по зернам достигала 10–15%, а UO_2 , как правило, не превышала 5–7% (при содержании ThO_2 и UO_2 4–25 и 0.1–1.5 мас. %,

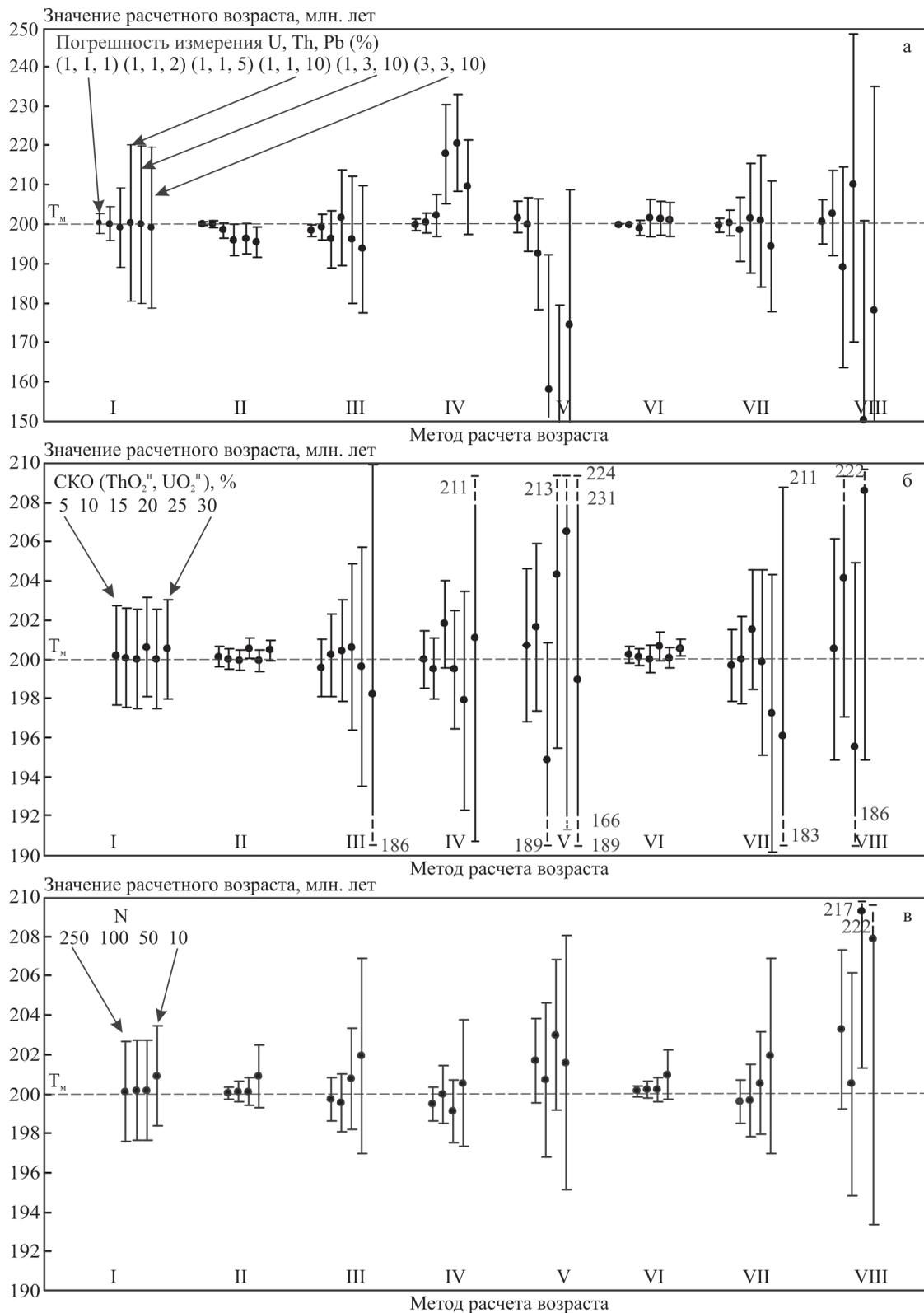


Рис. 6.11. Вариации расчетных значений возраста для системы-200 при различной относительной погрешности измерения U, Th, Pb (1, 1, 1; 1, 1, 2; 1, 1, 5; 1, 1, 10; 1, 3, 10 и 3, 3, 10 %) (а), различной дисперсии СКО(ThO_2^n)=СКО(UO_2^n) (5, 10, 15, 20, 25 и 30 %) (б) и различной статистике выборки N (250, 100, 50, 10) (в). В овалах – значения, полученные при $\Delta Pb/Pb=1-10$ и $\Delta U/U=\Delta Th/Th=1$ %

Fig. 6.11. Calculated ages for the model system-200 with different U, Th, Pb measurement errors (a), different MSWD (б) and different statistics N (в)

соответственно). Снижение значения СКО (UO_2) практически мало влияет на погрешность возраста III и, напротив, достаточно значимо на погрешность возраста V, VII–VIII. Последнее вполне понятно, поскольку в этом случае аналитические точки на Th/Pb-U/Pb- и ThO_2-UO_2-PbO -диаграммах имеют очень малый разброс по урановым осям, и изохроны (изохронные плоскости) вырождаются практически в точки (линии).

Величина погрешности определения возраста значимо зависит от соотношения числа статистических реализаций системы N (см. рис. 6.11, в)

и дисперсии содержаний ThO_2 и UO_2 . В частности, для системы-200 при $СКО(ThO_2)=СКО(UO_2)=30\%$ уменьшение N от 250 до 10 вызывает рост в разы погрешности всех расчетных значений изохронного возраста; снижение дисперсии до 5–10% при сохранении числа N , равном 100, также увеличивает их погрешность, но более чем на порядок. Таким образом, чем ниже СКО материнских элементов, тем выше должна быть величина N , чтобы значение погрешности для системы-200 было на уровне первых единиц млн. лет.

6.4. Датирование модельной дисконкордантной системы

Проблема открытости U-Th-Pb-системы минералов-геохронометров, их гетерогенности по возрасту – в центре внимания всех исследователей при выполнении прикладных работ по химическому датированию различных геологических объектов. В связи с этим актуальным представляется проведение в рамках различных расчетных процедур количественного анализа влияния на датирование системы наличия нерадиогенного Pb и потерь радиогенного, в том числе непропорциональных для двух изотопных подсистем (^{208}Pb и $^{207}Pb-^{206}Pb$). Особо отметим актуальность изучения гетерогенной по возрасту модельной системы, в частности, получен-

ной сложением нескольких близких по возрасту гомогенных подсистем. Последний случай имитирует «смешение» микронзондовых данных по двум разновозрастным зонам кристаллов в полигенных пробах. Анализ и химическому датированию подобных проб посвящено большое число публикаций (см. например, Cocherie, Albarede, 2001; Williams et al., 2006); была предложена схема выделения двух и более событий, разделенных интервалом в 50–100 млн. лет, в первую очередь основанная на данных элементного картирования зерен, однако общего решения вопроса о корректности датирования полигенных зерен минералов нет.

6.4.1. Анализ влияния возрастной гетерогенности модельной системы на ее датирование

Проанализировано влияние на качество датировки «степени возрастной гетерогенности» модельной системы, являющейся суперпозицией двух гомогенных систем. Полученные данные для значений возраста «бимодальной» системы- $(200+205)$, $(200+210)$ и $(200+220)$ при равенстве количества статистических реализаций в каждой из подсистем представлены в табл. IX. Анализ результатов показывает, что формальный подход для расчета возраста бимодальной системы (строки 1, 4 и 7 в табл. IX) приводит к получению значений в 203 ± 3 , 205 ± 3 и 210 ± 3 млн. лет, последние близки величине среднего арифметического возраста подсистем. Очевидно, что полученные датировки не корректны и «геологической» смысловой нагрузки не несут. Представляется, что использование следующего алгоритма датирования гетерогенной системы позволяет

частично решить проблему датировки гетерогенной системы:

1. анализ гистограммы распределения определений точечного возраста с выделением на ней экстремумов, в частности, с применением подхода «Age mixed» программы Isoplot 3.66;
2. выделение совокупностей статистических реализаций системы (точек на минерале), относящихся к разновозрастным подсистемам, на основании их положения на гистограмме и принадлежности к той или иной возрастной совокупности («кластеризация выборок данных» с выделением на ней экстремумов, относящихся к разновозрастным подсистемам) с применением разработанного программного продукта;
3. независимый изохронный анализ выделенных совокупностей статистических реализаций системы (разновозрастных подсистем или клас-

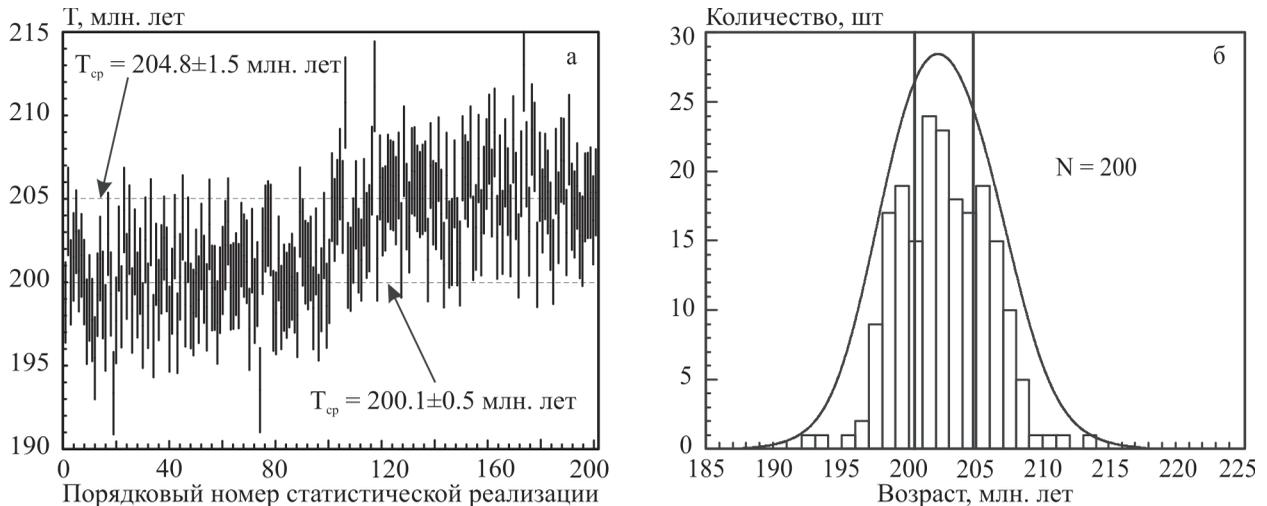


Рис. 6.12. Вариации значений точечного возраста (а) и гистограмма их распределения (б) для бимодальной системы-(200+205)

Fig. 6.12. Calculated Th-Th-U-Pb-ages I for the model bimodal system-(200+205), their averaged weighed value (a) and weighted-histogram representation of the data (b)

теров выборок данных) с их независимым датирование и «отсечением» точек, лежащих вне 2σ -зон у изохрон.

Предложенный алгоритм иллюстрируется данными, представленными на рис. 6.12 и в табл. IX (строки 2–3, 5–6 и 8–9); используя последний, удается достаточно корректно датировать бимодальные системы и оценить возраст составляющих их подсистем. Попытка датировать бимодальную систему-(200+202) с меньшим различием возрастов составляющих ее подсистем не привела к получению количественных результатов. По-видимому, величину порядка 5 млн. лет можно рассматривать в качестве предельной для «возрастного разрешения» при анализе суперпозиционной бимодальной системы с возрастом порядка 200 млн. лет. Действительно, как было

показано выше на основе использования гистограммы распределения точечных значений возраста для системы-200, погрешность его определения составляет первые единицы млн. лет.

На практике при исследовании полигенных зерен минералов изохронный анализ выделенных совокупностей аналитических точек (разновозрастных подсистем или кластеров данных) с их датированием должен сопровождаться детальным элементным картированием зерен кристаллов и выделением на них гомогенных зон; статистическая обработка возрастных данных должна проводиться согласованно с вычислением изохронных возрастов для гомогенных зон; без выделения таких зон у выборок точек с неким средним возрастом геологической смысловой нагрузки нет.

6.4.2. Анализ влияния добавок нерадиоогенного Pb и потерь радиоогенного на датирование модельной системы

Наличие в минерале-геохронометре нерадиоогенного Pb и диффузионные потери радиоогенного – достаточно распространенные случаи в практике химического микрозондового датирования: Pb может входить в структуру монацита, торанита, пироклора и др., его потери возможны при метаморфизме пород и других физико-химических процессах в природе. Очевидно, что получаемые при этом датировки некорректны и «геологической» смысловой нагрузки не несут. Заметим, что все известные в

литературе подходы предполагают, что U-Th-Pb-система минералов-геохронометров в той или иной степени закрыта; расчетные процедуры, развитые в работах (Montel et al., 1996; Cocherie, Albarede, 2001) корректны только при выполнении строгого условия, что нерадиоогенный Pb в минерале отсутствует. В связи с этим актуальным представляется проведение количественного анализа влияния на датирование системы в рамках различных расчетных процедур добавок нерадиоогенного Pb и потерь радиоогенного.

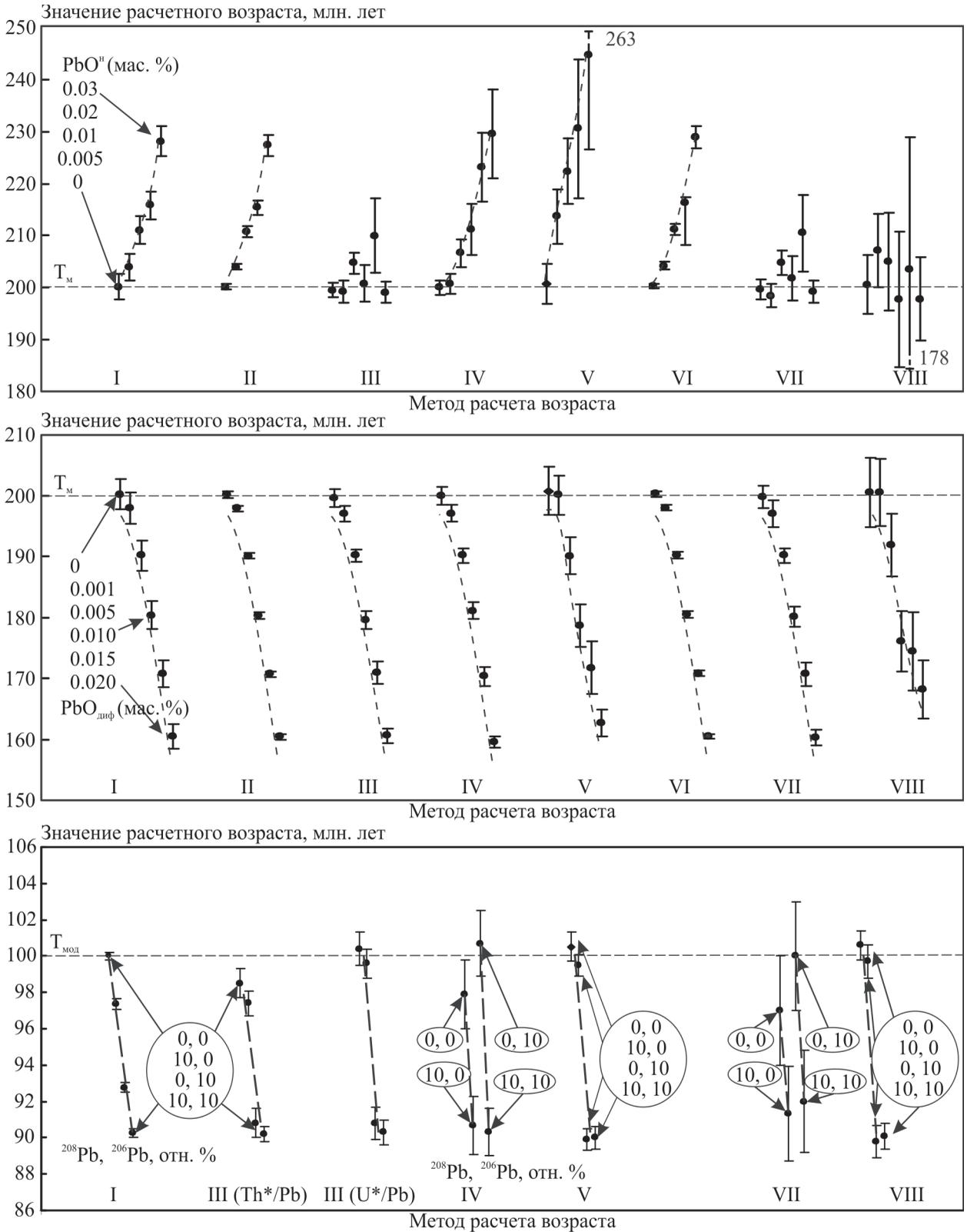


Рис. 6.13. Вариации расчетных значений возраста для системы-200 при начальном содержании PbO_n (0, 0.005, 0.010, 0.02, 0.03 мас. %) (а) и при диффузионных потерях PbO_n (0, 0.001, 0.005, 0.010, 0.015 и 0.02 мас. %) (б) и вариации расчетных значений возраста для системы-100 с $UO_2 = ThO_2 = 10\%$ при диффузионных потерях ^{208}Pb и ^{206}Pb (0, 0), (0.010, 0), (0, 0.010) и (0.010, 0.010 мас. %)

Fig. 6.13. Calculated ages for the model system-200 with initial PbO_n (a) and diffusive loss of PbO_n (б)

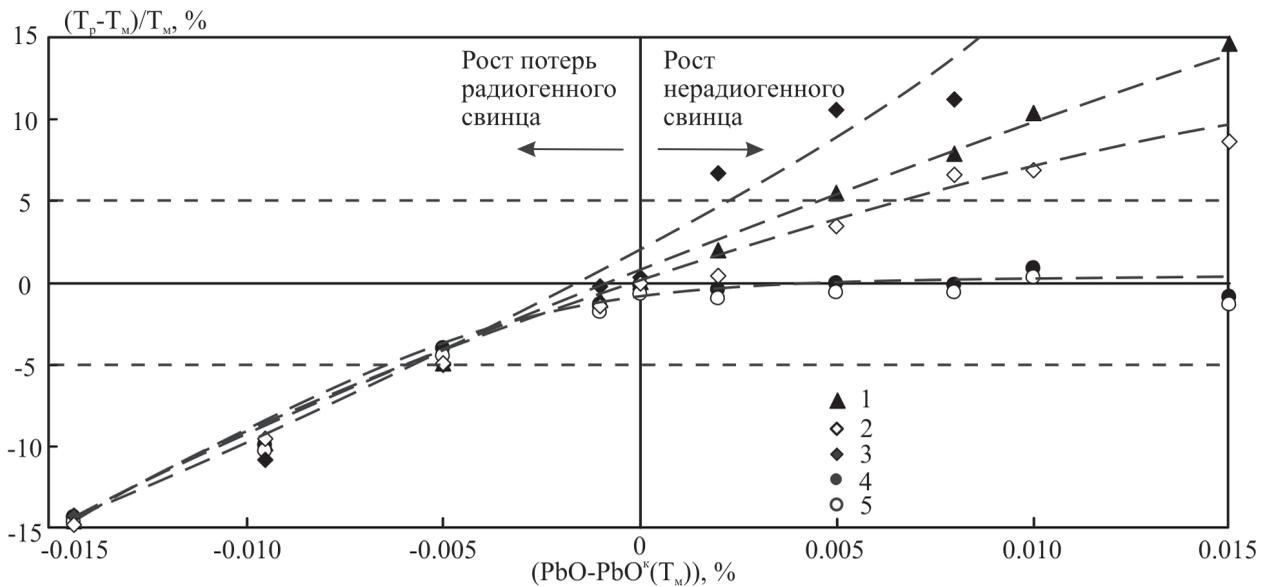


Рис. 6.14. Зависимость параметра $\delta = (T_p - T_m) / T_m$ для модельной системы-200 от содержания нерадиогенного Pb и потерь радиогенного. 1–3 – значения возраста I, IV, V; 4 – Th*/Pb-возраст III и U*/Pb-возраст III

Fig. 6.14. $(T_p - T_m) / T_m$ vs. PbO_n (PbO_d) plot for the model system-200 with and without initial PbO_n and Pb loss

Нами проанализировано влияние этих факторов на качество датировки модельной системы-200, причем рассмотрены два практически важных случая – пропорциональных и непропорциональных потерь двух изотопных подсистем (^{208}Pb и ^{207}Pb - ^{206}Pb).

Нерадиогенный Pb. Полученные данные для значений возраста модельной системы-200 с различным содержанием нерадиогенного Pb (при $PbO^H = 0, 0.002, 0.005, 0.008, 0.010, 0.015, 0.02, 0.03, 0.10$ мас. %) представлены в табл. X и на рис. 6.13. Заметим, что при моделировании величина PbO^H рассматривалась как случайная с дисперсией 30 %, что, как нам представляется, более адекватно соответствует составу реальных минералов.

При расчете значения точечного возраста из единичной статистической реализации системы полагается, что содержание нерадиогенного Pb пренебрежимо мало; в противном случае подход некорректен; представляется, что по параметру δ (рис. 6.14) можно оценить «степень его некорректности». Установлено, что введение в систему нерадиогенного Pb приводит к монотонному пропорциональному увеличению значений точечного возраста I и II; для системы-200 коэффициент корреляции значения возраста и содержания нерадиогенного Pb в интервале от 0 до 0.1 мас. % составляет 0.99. Из рис. 6.14 видно, что значение возраста I и II корректно

($|\delta| < 5\%$) при условии, что PbO^H не превосходят 0.03–0.05 мас. %. Важно отметить, что внутренней «диагностики» наличия (отсутствия) нерадиогенного Pb при использовании расчетной процедуры точечного датирования провести не удается.

Напротив, значение Th*/Pb-возраста III в пределах погрешности, которая достаточно значительно возрастает при введении в систему нерадиогенного Pb, согласуется с модельным возрастом: введение нерадиогенного Pb вызывает практически параллельный сдвиг ThO_2^* -PbO-изохрон вверх от начала координат на величину, которая близка к значению PbO^H (рис. 6.15); таким образом, оценка Th*/Pb-возраста III по углу наклона изохроны и в этом случае остается вполне корректной, однако погрешность датировки значимо (в разы!) увеличивается (см. табл. X).

На рис. 6.16 представлены значения Th*/Pb-возраста III и их погрешности для 50 статистических реализаций системы-200 с тремя различными содержаниями нерадиогенного Pb: видно, что увеличение PbO^H от 0 до 0.1 мас. % приводит к увеличению погрешности от 1 до 4 млн. лет (при $PbO^H=0.5$ мас. % до 13 млн. лет). Значение СКВО также существенно увеличивается с ростом добавки нерадиогенного Pb, но при этом само расчетное значение Th*/Pb-возраста III практически сохраняется близким к T_m , т.е. значимого «удрвления» системы за счет этой

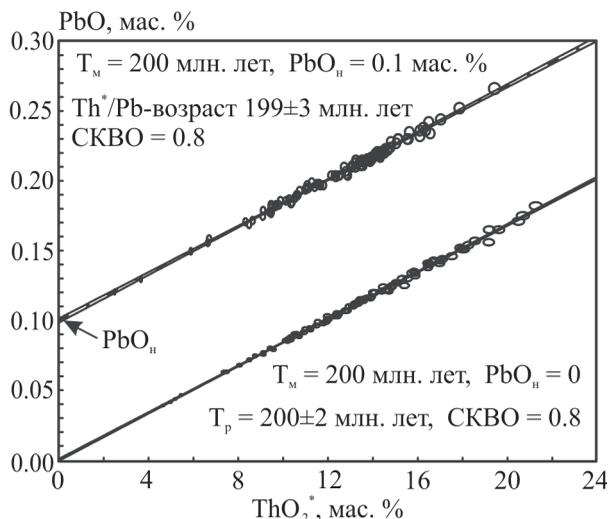


Рис. 6.15. ThO_2^* - PbO -данные для модельной системы-200 без и с начальным содержанием PbO

Fig. 6.15. ThO_2^* vs. PbO plot for the model system-200 with and without initial PbO_n

добавки не фиксируется, а численный параметр δ не превышает 3–5 % (см. рис. 6.14).

По определению, Th/Pb - U/Pb -изохронный подход не допускает наличия в минерале нерадиогенного Pb ; его присутствие вызывает отклонение линии регрессии от изохроны и несовпадение значений Th/Pb и U/Pb -возраста. Установлено, что введение в систему нерадиогенного Pb приводит к монотонному пропорциональному увеличению значений Th/Pb и U/Pb -возраста IV и V; в частности, для системы-200 коэффициент корреляции значений возраста и содержания нерадиогенного Pb в интервале 0–0.1 мас. % составляет 0.99; уже при содержании $\text{PbO}^n=0.01$ и 0.03 % значения Th/Pb и U/Pb -возраста IV и V начинают различаться достаточно значимо. Численные оценки для системы-200 показывают, что отклонение линии регрессии от изохроны, фиксируемые по росту параметра δ свыше 5 %, наступает уже при $\text{PbO}^n=0.008$ мас. % (см. рис. 6.14). Представляется, что равенство (неравенство) значений Th/Pb и U/Pb -возраста IV и V можно рассматривать как некий критерий для оценки корректности (качества) датировки: получение существенно различающихся возрастов однозначно указывает на необходимость пересмотра данных и их дальнейшего более углубленного анализа.

Значения возраста I, II, IV–VI значимо различаются между собой и существенно завышены

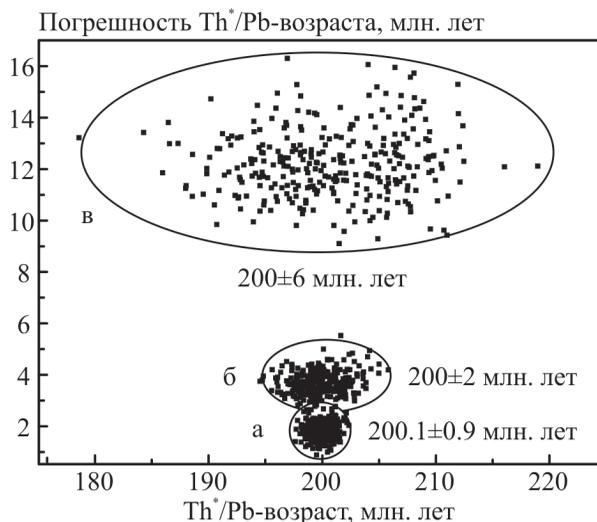


Рис. 6.16. Значения Th^*/Pb -возраста III для 50 статистических выборок по 100 реализаций в каждой для модельной системы-200 при начальном PbO_n (0, 0.1 и 0.5 % – поля а–в)

Fig. 6.16. Calculated Th^*/Pb -ages III for 50 statistic realizations of the model system-200 with initial PbO_n

по сравнению с модельным возрастом; погрешности их определения также существенно возрастают при введении в систему нерадиогенного Pb уже при концентрациях 0.005 мас. % и выше.

Значения Th/Pb и U/Pb -возраста VII–VIII менее «чувствительны» к введению в систему нерадиогенного Pb до концентрации 0.1 мас. %: фиксируется практически параллельный сдвиг всех изохронных плоскостей вверх от начала координат на величину b , которая близка к значению PbO^n , т.е. удревления возраста при этом не происходит, однако при этом значимо увеличивается погрешность датировки. Для системы-200 значения Th/Pb и U/Pb -возраста VII–VIII в пределах погрешности совпадают со значением модельного, причем возраст VIII определяется с большой погрешностью, что вполне очевидно для высокотермической системы-200 с отношением $\text{ThO}_2:\text{UO}_2 = 10:1$.

Таким образом, для системы-200 все рассчитанные значения возраста удовлетворительно согласуются между собой только в том случае, когда концентрация нерадиогенного Pb не превышает 0.002–0.003 мас. %. Данное значение, по-видимому, можно рассматривать в качестве предельного для корректной датировки минералов типа монацита.

Пропорциональные потери радиогенных изотопов ^{208}Pb и ^{207}Pb - ^{206}Pb . Полученные нами данные для значений возраста модельной системы-200 с различными потерями радиогенного Pb (при $\text{PbO}_{\text{диф}} = 0.001, 0.005, 0.010, 0.015$ и 0.02 мас. %) представлены в табл. XI и на рис. 6.13, б; в целом, можно говорить, что датировки крайне «чувствительны» к потерям радиогенного Pb. Установлено, что потеря системой Pb приводит к монотонному пропорциональному уменьшению значений возраста: коэффициент корреляции уменьшения точечного возраста I, II и величины потерь Pb в интервале 0–0.01 мас. % составляет 0.99; этот коэффициент близок к 0.99 и для всех остальных значений возраста III–VIII.

Таким образом, для модельной системы-200 все расчетные значения возраста удовлетворительно согласуются между собой и в пределах погрешности совпадают со значением модельного возраста только в том случае, когда потери радиогенного Pb не превосходят 0.001–0.0015 мас. %. Данное значение, по-видимому, можно рассматривать в качестве предельного для корректной датировки минералов типа монацита.

Непропорциональные потери радиогенных изотопов ^{208}Pb и ^{207}Pb - ^{206}Pb . В табл. XII и на рис. 6.13 представлены полученные нами данные для значений возраста I–VIII модельной системы-100 с $\text{UO}_2 = \text{ThO}_2 = 10$ % при различных диффузионных потерях двух изотопов ^{208}Pb и ^{206}Pb (0, 0; 0.010, 0; 0, 0.010 и 0.010, 0.010 мас. %). Видно, что датировки крайне «чувствительны» к этим потерям: происходит значительное «омоложение» возраста при потерях изотопов Pb, при этом обращает на себя внимание следующая интересная особенность: значения Th/Pb-возраста IV и VII проявляют «изотопную чувствительность», т.е. обработка чисто химических неизотопных данных в рамках процедур (Rhede et al., 1996) и (Cocherie, Albarede, 2001) позволяет фиксировать различное фракционирование изотопов ^{208}Pb и ^{206}Pb , а при обработке в рамках (Montel et al., 1996) и (Suzuki, Kato, 2008) этого не фиксируется (рис. 6.13). Интерпретация этой особенности возможна лишь на чисто качественном уровне. Представляется, что в первых двух подходах при аппроксимации совокупности точек плоскостью в ThO_2 - UO_2 - PbO -пространстве или прямой на Th/Pb-U/Pb-плоскости точки с различным отношением Th/U группируются в раз-

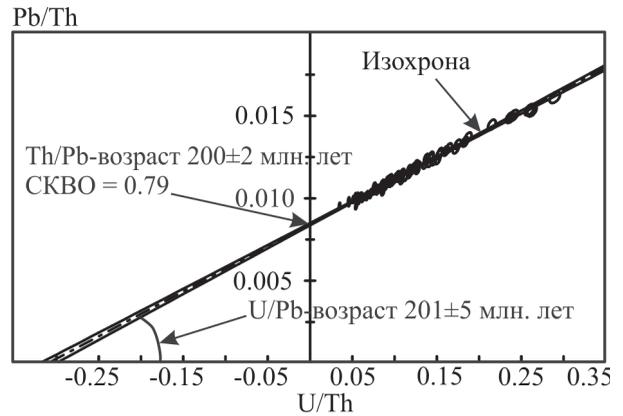


Рис. 6.17. Pb/Th-U/Th-данные для модельной системы-200

Fig. 6.17. Pb/Th vs. U/Pb plot for the model system-200

личных зонах диаграмм, но при этом они характеризуются существенно различным изотопным составом радиогенного Pb.

Pb/Th-U/Th-изохронный подход при датировании модельной системы с нерадиогенным Pb (потерями радиогенного). Содержание Pb в системе с возрастом t составляет:

$$\begin{aligned} \text{Pb} = & \text{Pb}^{\text{н}} + \text{Th} \cdot \{\exp(^{232}\lambda t) - 1\} \cdot (208/232) \\ & + 0.0072 \cdot \text{U} \cdot \{\exp(^{235}\lambda t) - 1\} \cdot (207/238.04) \\ & + 0.9928 \cdot \text{U} \cdot \{\exp(^{238}\lambda t) - 1\} \cdot (206/238.04). \end{aligned}$$

В предположении, что отношение $\text{Pb}^{\text{н}}/\text{Th}$ (или $\text{Pb}^{\text{н}}/\text{U}$) пренебрежимо мало, что достаточно часто имеет место на практике, можно получить уравнения изохрон в виде:

$x = (\exp \lambda_{232} t - 1) + y \cdot \{(\exp \lambda_{235} t - 1) + \text{const} \cdot (\exp \lambda_{238} t - 1)\}$, где x, y – координаты определены как U/Th, Pb/Th для высокотермической системы и Th/U, Pb/U – для высокоурановой; при этом Th/Pb-возраст рассчитывается по координате точки пересечения изохроны с осью ординат (далее возраст IX), а U/Pb-возраст – по углу ее наклона к оси абсцисс (далее возраст X). Насколько нам известно, ранее данный подход не рассматривался.

На диаграмме (Pb/Th-U/Th) (рис. 6.17) представлены типичные результаты для модельной системы-200; они укладываются на изохрону со значениями Th/Pb- и U/Pb-возраста IX и X в 199.7 ± 1.6 и 201.2 ± 4.5 млн. лет (СКВО=0.79), соответственно.

В табл. 6.3 и на рис. 6.18 представлены вариации расчетных значений возраста для 2000 статистических реализаций модельной системы-200, разделенных на 20 выборок по 100 реализаций в каждой. Усредненное по ним значе-

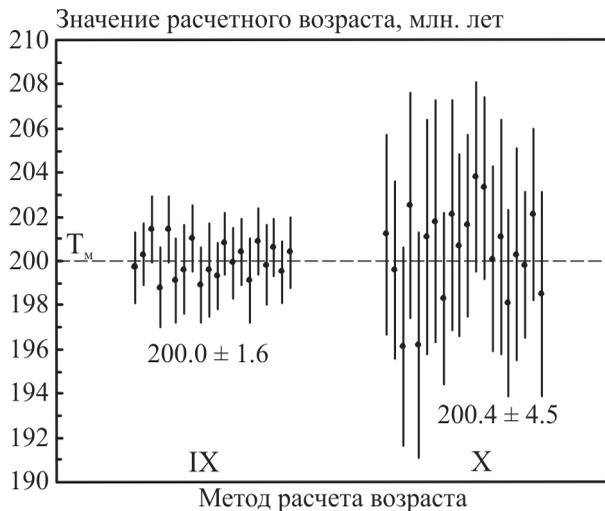


Рис. 6.18. Вариации расчетных значений Th/Pb- и U/Pb-возраста IX и X для 20 выборок модельной системы-200 по 100 статистических реализаций в каждой. Числа на диаграмме – среднее значения возраста и его погрешности, млн. лет.

Fig. 6.18. Calculated Th/Pb-, U/Pb-age IX and X for 20 statistic realizations of the model system-200

ние погрешности Th/Pb-возраста IX составляет порядка ± 1.6 млн. лет и сопоставимо с таковым для возраста III; напротив погрешность определения U/Pb-возраста X – существенно выше (порядка ± 4.5 млн. лет).

Таблица 6.3. Значения возраста для 20 статистических выборок системы-200 по 100 реализаций в каждой
Table 6.3. Calculated ages for 20 statistic realizations of the model system-200

№	Значения возраста, млн. лет и величина СКВО		№	Значения возраста, млн. лет и величина СКВО	
	IX*	X*		IX*	X*
1	199.7 ± 1.6 (0.79)	201.2 ± 4.5	11	199.3 ± 1.5 (1.05)	201.6 ± 4.1
2	200.3 ± 1.4 (0.99)	199.6 ± 4.0	12	200.8 ± 1.4 (1.19)	203.8 ± 4.3
3	201.4 ± 1.5 (0.78)	196.1 ± 4.5	13	199.9 ± 1.6 (1.17)	203.3 ± 4.1
4	198.8 ± 1.8 (1.02)	202.5 ± 5.1	14	200.4 ± 1.5 (1.03)	200.1 ± 4.2
5	201.4 ± 1.5 (0.85)	196.2 ± 5.1	15	199.1 ± 1.9 (1.30)	201.1 ± 5.3
6	199.1 ± 1.9 (1.30)	201.1 ± 5.3	16	200.9 ± 1.5 (0.83)	198.1 ± 4.2
7	199.6 ± 2.0 (1.60)	201.8 ± 5.5	17	199.8 ± 1.8 (1.13)	200.3 ± 4.8
8	201.0 ± 1.5 (0.95)	198.3 ± 3.9	18	200.6 ± 1.3 (1.12)	199.8 ± 3.3
9	198.9 ± 1.7(1.30)	202.1 ± 5.2	19	199.5 ± 1.4 (0.74)	202.1 ± 3.9
10	199.6 ± 2.1 (0.96)	200.7 ± 4.1	20	200.4 ± 1.6 (1.08)	198.5 ± 4.6

Примечание. * IX–X – значения Th/Pb- и U/Pb-возраста, определенные по Pb/Th-U/Th-изохроне.

На рис. 6.18 представлены Pb/Th-U/Th-данные для модельной системы-200, а в табл. 6.4 значения ее возраста IX и X при различных начальных содержаниях UO_2^n , ThO_2^n , PbO^n , диффузионных потерях PbO_d и погрешности измерения $\Delta Th/Th$, $\Delta U/U$ и $\Delta Pb/Pb$.

Из представленных данных видно, что использование предложенной нами схемы расчета возраста приводит к устойчивым значениям T_p и погрешности его определения ΔT_p при варьировании начальных содержаниях UO_2^n и ThO_2^n и погрешностей измерения Th, U и Pb. При этом, как и для большинства расчетных подходов, изменение содержания нерадиогенного Pb и потери радиогенного приводят к искажению датировок. Введение в систему нерадиогенного Pb приводит к увеличению расчетного возраста: для системы-200 значение параметра δ не превышает 5 % в том случае, когда концентрация нерадиогенного Pb не превышает 0.005–0.008 мас. %. Потеря системой радиогенного Pb приводит к омоложению расчетного возраста; для системы-200 расчетный возраст в пределе 5 % совпадает со значением модельного в том случае, когда потери радиогенного Pb не превосходят 0.001–0.0015 мас. %. Данные значения можно рассматривать в качестве предельных для корректной датировки минералов типа монацита.

Сравнение устойчивости определения возраста при варьировании концентраций Th и U, погрешностей измерения Th, U и Pb, введения нерадиогенного Pb и потерь радиогенного с устойчивостью возраста, получаемой в известных расчетных процедурах, показывает, что по данным параметрам предлагаемый способ не уступает или, в ряде случаев, превосходит их. Этот факт показывает, что включение предлагаемого пятого способа в общую схему определения возраста, основанную на четырех расчетных подходах (табл. XIII), позволяет повысить точность расчета возраста минералов.

Кратко суммируя полученные результаты, отметим следующее.

1. Разработана методология и созданы программные продукты для выполнения вычислительного эксперимента по моделированию эволюции статистической U-Th-Pb-системы и расчета значений ее возраста в рамках четырех альтернативных подходов:

- по единичным статистическим реализациям содержания U, Th и Pb в модельной системе с расчетом N значений ее точечного U-Th-Pb-возраста, а также среднего и средне-взвешен-

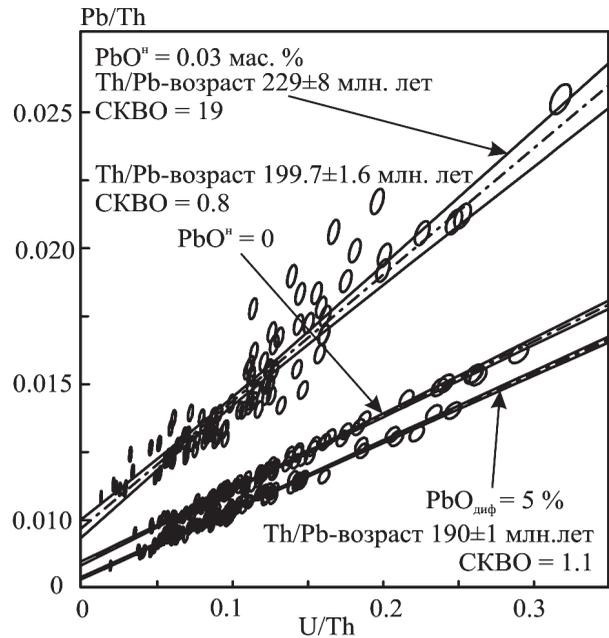


Рис. 6.19. Pb/Th-U/Th -данные для модельной системы-200 без потерь и привноса Pb, для системы-200 с начальным $PbO_n = 0.03\%$ и с диффузионными потерями $PbO_d = 5\%$

Fig. 6.19. Pb/Th vs U/Pb plot for the model system-200 with and without Pb loss, for the model system-200 with initial $PbO_n = 0.03\%$ and diffusive loss of $PbO_d = 5\%$

Таблица 6.4. Значения возраста IX и X модельной системы-200 при различных начальных содержаниях UO_2^n , ThO_2^n , PbO^n , потерях PbO_d и погрешностях измерения Th, U и Pb

Table 6.4. Values of calculated ages IX and X for the model system-200 with different initial contents of UO_2^n , ThO_2^n , PbO^n , losses of PbO_d and measurement errors of Th, U and Pb

№	Параметр		Значения возраста, млн. лет	
			IX	X
1	Содержание UO_2^n и ThO_2^n , мас. %	10 и 1	199.7 ± 1.6	199.1 ± 1.3
		10 и 2	199.0 ± 1.9	198.3 ± 1.2
		10 и 5	200.8 ± 2.6	197.5 ± 1.4
		10 и 8	201.6 ± 3.1	198.3 ± 1.6
		10 и 10	201.2 ± 4.0	199.4 ± 1.4
2	Содержание PbO^n , мас. %	0	199.7 ± 1.6	201.2 ± 4.5
		0.002	200.5 ± 1.8	214.2 ± 5.0
		0.005	206.2 ± 2.6	222.7 ± 6.4
3	PbO_d , мас. %	0	199.7 ± 1.6	201.2 ± 4.5
		0.001	197.0 ± 1.4	200.0 ± 3.6
		0.005	190.0 ± 1.1	190.3 ± 3.0
4	Погрешность $\Delta Th/Th$, $\Delta U/U$ и $\Delta Pb/Pb$, отн. %	1, 1, 1	199.7 ± 1.6	201.2 ± 4.5
		1, 1, 2	199.7 ± 2.6	200 ± 7
		1, 1, 5	199.8 ± 6.6	193 ± 15
		1, 1, 10	196.5 ± 11.3	184 ± 33
		1, 3, 10	206.0 ± 12.5	182 ± 33
		3, 3, 10	196.8 ± 12.3	181 ± 35

ного значения по возрастным гистограммам;

- по ThO_2^* -PbO- или UO_2^* -PbO-изохроне для выборки из N статистических реализаций содержания U, Th и Pb в модельной высокотемпературной или высокоурановой системе;

- по Th/Pb-U/Pb- и Pb/Th-U/Th-изохронам, а также по ThO_2 -PbO- UO_2 -изохронной плоскости для выборки из значений содержаний U, Th и Pb в системе.

2. Проведен вычислительный эксперимент по моделированию эволюции модельной статистической системы при варьировании всех ее основных характеристик (U-Th-состава, модельного возраста, дисперсии и соотноше-

ния содержаний U и Th, погрешности определения содержания элементов U, Th и Pb, наличия добавок нерадиоактивного Pb и потерь радиоактивного, в том числе непропорционального для различных изотопов, а также суперпозиции нескольких близких по возрасту подсистем) с последующим расчетом, сопоставлением и анализом значений возраста, погрешности его определения и СКВО датирования.

3. Показано, что для корректной датировки необходим комплексный подход, включающий использование всех альтернативных методов расчета и сравнение получаемых значений возраста.