

С.В. Рассказов, С.Б. Брандт,
И.С. Брандт, А.В. Иванов

**РАДИОИЗОТОПНАЯ
ГЕОЛОГИЯ**

в задачах и примерах

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
SIBERIAN BRANCH
INSTITUTE OF EARTH CRUST
MINISTRY OF EDUCATION OF RUSSIAN FEDERATION
IRKUTSK STATE UNIVERSITY

**S.V. Rasskazov, S.B. Brandt,
I.S. Brandt, A.V. Ivanov**

RADIOGENIC ISOTOPE GEOLOGY IN PROBLEMS AND EXAMPLES

Scientific editors
Academic member, Prof. E.V. Sklyarov
Prof. S.V. Rasskazov

NOVOSIBIRSK
ACADEMIC PUBLISHING HOUSE "GEO"
2005

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОУ ВПО ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**С. В. Рассказов, С.Б. Брандт,
И. С. Брандт, А. В. Иванов**

РАДИОИЗОТОПНАЯ ГЕОЛОГИЯ В ЗАДАЧАХ И ПРИМЕРАХ

Научные редакторы
член-корреспондент РАН, профессор Е.В. Складов
доктор геолого-минералогических наук, профессор С.В. Рассказов

НОВОСИБИРСК
АКАДЕМИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ГЕО"
2005

УДК 550.42:551.14 + 550.93 (51+778/789 + 678)

ББК 24.13

P244

Авторы

С.В. Рассказов, С.Б. Брандт, И.С. Брандт, А.В. Иванов,

Т.А. Ясыгина, Е.И. Демонтерова, А.М. Ильясова

rassk@crust.irk.ru

Рассказов С.В. Радиоизотопная геология в задачах и примерах / С.В. Рассказов, С.Б. Брандт, И.С. Брандт и др. ; Ин-т земной коры СО РАН. – Новосибирск : Академическое издательство “Гео”, 2005. – 268 с. ISBN 5–9747–0023–6

Показаны возможности современных радиоизотопных методов для решения задач теоретического характера и практической геологии. Особое внимание уделено теоретическим разработкам в термохронологии. Обсуждаются результаты радиоизотопных определений времени образования Земли, основных рубежей эволюции биоты фанерозоя, важнейших тектонических и магматических событий позднего мезозоя и кайнозоя в Центральной и Восточной Азии, на Западе Северной Америки и на Северо-Востоке Африки. Изложены подходы к определению источников магматических расплавов на континентах и в зоне перехода континент–океан по изотопно-геохимическим данным. Строгий математический аппарат радиоизотопной геологии в доступном изложении, с конкретными численными примерами и таблицами может быть использован при решении теоретических вопросов происхождения и эволюции Земли, при постановке задач региональных геохронологических исследований и при датировании конкретных геологических объектов.

Книга представляет интерес для специалистов-геохронологов, студентов – слушателей курса по радиоизотопной геохронологии и геологов, использующих прецизионные изотопные данные.

This monograph shows a modern level of radiogenic isotope methods for solutions on problems in theoretical and practical geology. New approaches on thermochronology are of particular interest. Results on age measurements for timing of the Earth's formation, main stages in evolution of biota in the Phanerozoic, and the most important tectonic and magmatic events in the Late Mesozoic through Cenozoic of Central and East Asia, western margin of North America, and Northeastern Africa are discussed. Systematics of magmatic sources in terms of isotope geochemistry in continents and ocean-continent transition zones is discussed. Formal mathematical considerations on radiogenic isotope geology presented in simple way with numerical examples and tables can be used for solutions of theoretical problems on origin and evolution of the Earth as well as for correct selection of material in regional geochronological studies and dating of individual geological objects.

The book is intended for professional geochronologists, students who study course on radiogenic isotope geology, and geologists who use high precision isotopic data.

Рецензенты

д-р геол.-мин. наук Г.Я. Абрамович

канд. геол.-мин. наук С.И. Дриль

д-р геол.-мин. наук В.А. Пономарчук

канд. геол.-мин. наук Л.З. Резницкий

*Подготовка рукописи осуществлялась при финансовой поддержке
Федеральной целевой программы “Интеграция” 2003 г., грант Ц 3027 – 1448*

ISBN 5–9747–0023–6

© Коллектив авторов, 2005

© ИЗК СО РАН, 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Часть I. ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ, ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	7
Глава 1. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ	10
1.1. Закон Резерфорда–Содди	–
1.2. Определение констант радиоактивного превращения	12
1.3. Измерение концентраций изотопов и изотопных отношений	13
1.4. Метод изотопного разбавления	14
1.5. Статистическая оценка результатов измерений	16
Глава 2. ГЕОХРОНОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	18
2.1. Изохронная модель	–
2.1.1. Изохронная плоскость	–
2.1.2. Обычная изохрона Rb-Sr-изотопной системы	21
2.1.3. Изохрона изотопов свинца	23
2.2. Модель “конкордия–дискордия”	24
2.3. Преобразование координат изохрон и дискордий	29
2.3.1. Изохрона	–
2.3.2. Дискордия в системе “конкордия–дискордия”	31
Глава 3. ОСНОВНЫЕ ГЕОХРОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗОТОПНЫЕ СИСТЕМЫ	33
3.1. K-Ar-изотопная система	–
3.1.1. Константы радиоактивного превращения ^{40}K	–
3.1.2. K-Ar-метод	35
3.1.3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -метод	39
3.1.4. Масс-спектрометрическое оборудование	43
3.2. Th,U-Pb-изотопная система	–
3.2.1. Константы радиоактивного превращения ^{238}U и ^{235}U	44
3.2.2. U-Pb-датирование акцессорных минералов	–
3.2.3. Pb-Pb-датирование	47
3.2.4. Масс-спектрометрическое оборудование	–
3.3. Rb-Sr-изотопная система	48
3.3.1. Константы радиоактивного превращения ^{87}Rb	–
3.3.2. Особенности Rb-Sr-метода датирования	–
3.3.3. Масс-спектрометрическое оборудование	49
3.4. Sm-Nd-изотопная система	–
3.4.1. Константы радиоактивного превращения ^{147}Sm	–
3.4.2. Особенности Sm-Nd-метода датирования	50
3.4.3. Масс-спектрометрическое оборудование	–
3.5. Re-Os-изотопная система	–
3.5.1. Константы радиоактивного превращения изотопа ^{187}Re	–
3.5.2. Особенности Re-Os-метода датирования	51
3.5.3. Масс-спектрометрическое оборудование	52
3.6. Изотопные системы исчезнувших радионуклидов	53
3.7. Изотопная система ^{14}C	54
3.7.1. Константы радиоактивного превращения ^{14}C	55
3.7.2. Особенности измерений ^{14}C	56

Часть II. ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ	57
Глава 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОГЕННОГО АРГОНА ВНУТРИ МИНЕРАЛА	60
4.1. Переход от открытой К-Аг-изотопной системы к закрытой: коэффициент α	–
4.2. Определение коэффициента α традиционным К-Аг-методом	62
4.3. Влияние на диффузионные параметры распределения концентрации аргона внутри минерала при его потерях	63
Глава 5. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СПЕКТРЫ ИЗОТОПОВ АРГОНА	66
5.1. Представление аргон-аргоновых спектров на диаграммах	–
5.2. Гистограммы аргон-аргоновых спектров	67
5.3. Вывод алгебраического выражения для изохроны в аргон-аргоновых координатах	70
5.4. Кинетика ступенчатого нагрева	71
5.5. Одинаковые энергии активации контаминирующего, радиогенного и нуклеогенного аргона	72
5.6. Разделение радиогенного и атмосферного аргона	–
5.7. Более слабая связь контаминирующего аргона с кристаллической структурой, чем радиогенного и нуклеогенного: $E_c < E_{\text{рад}} = E_{39}$	73
5.8. Энергия активации нуклеогенного аргона ниже радиогенного и выше контаминирующего: $E_c < E_{39} < E_{\text{рад}}$	75
5.9. Потери радиогенного аргона в геологическом прошлом	76
5.10. Избыточный аргон-40	77
5.11. Аргон полиминеральных агрегатов	–
5.12. Аргон двухкомпонентных кристаллических структур	79
5.13. Необратимые процессы термального выделения аргона из минеральных фаз с меняющимся составом	81
Глава 6. РАДИОГЕННЫЙ АРГОН В ОСТЫВАЮЩЕЙ ДАЙКЕ	86
6.1. Кинетика аргона	–
6.2. Расчет К-Аг-изотопных балансов в остывающей дайке	88
6.3. Замыкание изотопной системы	92
6.4. Применение расчетов температурной области замыкания изотопной системы остывающего магматического тела	93
Глава 7. РАДИОГЕННЫЕ ИЗОТОПЫ В ЭКЗОКОНТАКТОВОЙ ЗОНЕ МАГМАТИЧЕСКОГО ТЕЛА	95
7.1. Термическая модель	96
7.2. Сохранность радиогенного аргона при переменной температуре	98
7.3. Расчет кажущегося возраста в одномерном случае	99
7.4. Расчет кажущегося возраста в двухмерном и трехмерном случаях	100
7.5. Сопоставление результатов теоретических расчетов с данными измерений изотопов в экзоконтактной зоне штока Эльдора	101
7.6. Изотопные данные по экзоконтактной зоне Эльджуртинского гранитного массива	102
Глава 8. ДИФФУЗИЯ В РЕЖИМЕ ЛАПЛАСА	104
8.1. Вывод уравнения лапласового возраста	–
8.2. Геологическая обстановка эволюции изотопных систем в режиме Лапласа	106
Часть III. РАДИОИЗОТОПНАЯ ГЕОХРОНОЛОГИЯ	109
Глава 9. ВРЕМЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗЕМЛИ	112
9.1. Догеологическая история (4,57–4,54 млрд лет назад), по результатам изучения метеоритов)	113

9.1.1. Классификация метеоритов	–
9.1.2. Возраст метеоритов	114
9.1.3. Определение времени формирования Земли и планет земной группы по короткоживущим радионуклидам	116
9.1.4. Кристаллизация железного ядра астероидов	118
9.2. Первичная кора Земли 4,4–4,0 млрд лет назад	119
9.3. Тектонические процессы архея 4,0–2,5 млрд лет назад	120
9.4. Древнейшие породы Северо-Востока Азии	122
Глава 10. ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ РУБЕЖИ ФАНЕРОЗОЯ	123
10.1. Рубеж докембрия и кембрия	–
10.1.1. Стратотипические разрезы	–
10.1.2. Радиоизотопные датировки	–
10.1.3. События и гипотезы	125
10.1.4. Возраст заключительного щелочно-ультраосновного магматизма с карбонатами в Присаянье	–
10.2. Рубеж перми и триаса	128
10.2.1. Стратотипические разрезы	–
10.2.2. Радиоизотопные датировки	129
10.2.3. События	130
10.2.4. Гипотезы	–
10.2.5. Датирование траппов Сибирской провинции	131
10.3. Рубеж мела и палеогена	139
10.3.1. Подходы к определению границы	–
10.3.2. Радиоизотопные датировки границы	140
10.3.3. Гипотезы	–
10.3.4. Датирование траппов Декана	141
Глава 11. МАГМАТИЧЕСКИЕ ИНТЕРВАЛЫ ПОЗДНЕГО МЕЗОЗОЯ И КАЙНОЗОЯ ЗАПАДА СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ И СЕВЕРО-ВОСТОКА АФРИКИ	143
11.1. Северная Америка	–
11.1.1. Этап миграции магматизма кислого–среднего состава от окраины в глубину континента 120–35 млн лет назад	144
11.1.2. Этап смены магматизма среднего–кислого состава базальтовым магматизмом 33–15 млн лет назад	146
11.1.3. Этап преимущественно базальтового вулканизма последних 15 млн лет	147
11.1.4. Геодинамические модели	148
11.2. Северо-Восточная Африка	149
11.2.1. Датирование наиболее ранних вулканических пород Западного рифта	150
11.2.2. Распространение магматизма и рифтогенеза в Красноморско-Эфиопско-Кенийской ветви рифтов	152
11.2.3. Двустороннее распространение внутриконтинентального рифтогенеза и магматизма	153
11.2.4. Геодинамика Восточно-Африканского плато	154
Глава 12. МАГМАТИЧЕСКИЕ ИНТЕРВАЛЫ ПОЗДНЕГО МЕЗОЗОЯ И КАЙНОЗОЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ВОСТОЧНОЙ АЗИИ	156
12.1. Альбский век	–
12.1.1. Радиоизотопные датировки	–
12.1.2. Сопоставления	157

12.2. Танетский век	158
12.2.1. Радиоизотопные датировки	158
12.2.2. Обстановка проявления вулканизма	159
12.3. Средний и поздний кайнозой	161
12.3.1. Южное Приморье	–
12.3.2. Монголия и сопредельная территория Юга Восточной Сибири	166
12.4. Иерархия мезозойско-кайнозойских магматических событий	174
12.5. Синхронные и асинхронные магматические интервалы Азии, Запада Северной Америки и Северо-Востока Африки	178
Часть IV. ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ГЕТЕРОГЕННОСТЬ МАНТИИ И КОРЫ	181
Глава 13. ОТТОРЖЕННЫЕ (РУДНЫЕ) СВИНЦЫ	184
13.1. Модели отторжения	–
13.1.1. Одностадийные модели	–
13.1.2. Аномальные отторженные свинцы, параллелограмм Гейсса	185
13.1.3. Свинцы материнско-дочерней системы или отторженные?	187
13.2. Отторженные свинцы из рудных месторождений Восточной Азии	–
Глава 14. СЛОЖНОСТИ И НЕСООТВЕТСТВИЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ	
В Th,U-Pb ИЗОТОПНОЙ СИСТЕМЕ	190
14.1. Свинцовые парадоксы	–
14.2. Дискордия как результат потерь свинца при метаморфическом событии	191
14.3. Дискордия как результат радиоактивного накопления в сочетании с континуальной диффузией	193
Глава 15. ИСТОЧНИКИ КАЙНОЗОЙСКИХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД	198
15.1. Диаграммы смешения	199
15.1.1. Диаграмма $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 - 1/\text{Sr}$	–
15.1.1.1. Вывод основной формулы смешения двух изотопных фаз стронция	–
15.1.1.2. Варианты распределения точек магматических пород на диаграмме $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 - 1/\text{Sr}$	201
15.1.2. Диаграмма $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	203
15.2. Эмпирическая изотопная систематика океанических базальтов	205
15.3. Неоднозначность идентификации конечных компонентов океанических базальтов в вулканических породах континентов	208
15.4. Литосферные выплавки в вулканических породах континентов	209
15.5. Компоненты литосферы и подлитосферной конвектирующей мантии в вулканических породах внутренних частей континентов	–
15.5.1. Центральная Азия	210
15.5.2. Северо-Восток Африки	212
15.6. Компоненты в вулканических породах зоны перехода океан–континент	214
15.6.1. Западная окраина Северной Америки	215
15.6.2. Восточная окраина Азии	227
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	234
ЛИТЕРАТУРА	236

CONTENTS

PREFACE	5
Section I. BASIC MODELS, CONCEPTS, AND DEFINITIONS	7
Chapter 1. GENERAL THEORY	10
1.1. Rutherford–Soddy law	–
1.2. Determination of radioactive transformation constants	12
1.3. Measurement of isotope concentrations and isotope ratios	13
1.4. Isotope dilution method	14
1.5. Statistical estimation of measurement results	16
Chapter 2. GEOCHRONOMETRIC MODELS	18
2.1. Isochron model	–
2.1.1. Isochron plane	–
2.1.2. Standard Rb-Sr isochron	21
2.1.3. Pb-Pb isochron	23
2.2. Concordia-discordia model	24
2.3. Transformation of isochron and discordia coordinates	29
2.3.1. Isochron	–
2.3.2. Discordia in the system concordia–discordia	31
Chapter 3. PRINCIPAL GEOCHRONOMETRIC ISOTOPE SYSTEMS	33
3.1. K-Ar isotope system	–
3.1.1. Constants of radioactive transformation of ^{40}K	–
3.1.2. K-Ar method	35
3.1.3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method	39
3.1.4. Mass spectrometers	43
3.2. Th,U-Pb isotope system	–
3.2.1. Constants of radioactive transformation of ^{238}U and ^{235}U	44
3.2.2. U-Pb dating of accessory minerals	–
3.2.3. Pb-Pb dating	47
3.2.4. Mass spectrometers	–
3.3. Rb-Sr isotope system	48
3.3.1. Constants of radioactive transformation of ^{87}Rb	–
3.3.2. Characteristics of the Rb-Sr dating method	–
3.3.3. Mass spectrometers	49
3.4. Sm-Nd isotope system	–
3.4.1. Constants of radioactive transformation of ^{147}Sm	–
3.4.2. Characteristics of the Sm-Nd dating method	50
3.4.3. Mass spectrometers	–
3.5. Re-Os isotope system	–
3.5.1. Constants of radioactive transformation of ^{187}Re	–
3.5.2. Characteristics of the Re-Os dating method	51
3.5.3. Mass spectrometers	52
3.6. Isotope systems of extinct radionuclides	53
3.7. Isotope system of ^{14}C	54
3.7.1. Constants of radioactive transformation of ^{14}C	55
3.7.2. Measurement of ^{14}C	56

Section II. THERMOCHRONOLOGY	57
Chapter 4. DISTRIBUTION OF RADIOGENIC ARGON WITHIN A MINERAL	60
4.1. Transition from open to close K-Ar isotope system: coefficient α	–
4.2. Determination of coefficient α by the standard K-Ar method	62
4.3. Dependence of diffusion parameters on the distribution of argon within a mineral on argon loss	63
Chapter 5. TEMPERATURE SPECTRA OF ARGON ISOTOPES	66
5.1. Ar-Ar spectra diagrams	–
5.2. Ar-Ar spectra histograms	67
5.3. Derivation of an algebraic equation for Ar-Ar isochron	70
5.4. Kinetics of stepwise heating	71
5.5. Equal activation energies of contaminating, radiogenic, and nucleogenic argon	72
5.6. Separation of radiogenic and atmospheric argon	–
5.7. The activation energy of contaminating argon is lower than the activation energies of radiogenic and nucleogenic argon: $E_c < E_{rad} = E_{39}$	73
5.8. The activation energy of nucleogenic argon is intermediate between the activation energies of contaminating and radiogenic argon: $E_c < E_{39} < E_{rad}$	75
5.9. Loss of radiogenic argon in the geologic past	76
5.10. Excess ^{40}Ar	77
5.11. Argon of polymineral aggregates	–
5.12. Argon of two-component crystalline structures	79
5.13. Irreversible processes of thermal release of argon from mineral phases of varying composition	81
Chapter 6. RADIOGENIC ARGON IN A COOLING DIKE	86
6.1. Argon kinetics	–
6.2. Calculation of K-Ar isotope balances in a cooling dike	88
6.3. Closure of the isotope system	92
6.4. Application of calculations of the temperature region corresponding to the closure of the isotope system of a cooling magmatic body	93
Chapter 7. RADIOGENIC ISOTOPES IN AN EXOCONTACT ZONE OF A MAGMATIC BODY	95
7.1. Thermal model	96
7.2. Conservation of radiogenic argon at variable temperatures	98
7.3. Apparent-age calculation in 1D models	99
7.4. Apparent-age calculation in 2D and 3D models	100
7.5. Comparison of results of theoretical calculations with measurements of isotopes in the exocontact zone of the Eldora Stock	101
7.6. Isotope data on the exocontact zone of the Eldzhurta granite massif	102
Chapter 8. DIFFUSION IN A LAPLACE REGIME	104
8.1. Derivation of the Laplace equation of age	–
8.2. Geologic setting of evolution of isotope systems in the Laplace regime	106
Section III. RADIOGENIC ISOTOPE GEOCHRONOLOGY	109
Chapter 9. THE TIME OF THE EARTH'S ORIGIN	112
9.1. Pregeologic history (4.57–4.54 Ga, as inferred from studying meteorites)	113
9.1.1. Classification of meteorites	–
9.1.2. Age of meteorites	114

9.1.3. Short-lived radionuclide dating of the Earth and terrestrial planets	116
9.1.4. Crystallization of the iron cores of asteroids	188
9.2. Primary Earth's crust (4.4–4.0 Ga)	119
9.3. Tectonic processes in the Archean (4.0–2.5 Ga).....	120
9.4. The most ancient rocks in northeastern Asia	122
Chapter 10. GEOCHRONOLOGIC PHANEROZOIC BOUNDARIES.....	123
10.1. Precambrian-Cambrian boundary	–
10.1.1. Stratotype sections	–
10.1.2. Radiogenic isotope dates	–
10.1.3. Events and hypotheses	125
10.1.4. The age of the final alkaline-ultrabasic carbonatite magmatism in the Sayan region.....	–
10.2. Permian-Triassic boundary.....	128
10.2.1. Stratotype sections	–
10.2.2. Radiogenic isotope dates	129
10.2.3. Events	130
10.2.4. Hypotheses	–
10.2.5. Dating of traps from the Siberian province	131
10.3. Cretaceous-Paleogene boundary	139
10.3.1. Approaches to defining the boundary	–
10.3.2. Radioisotope dates of the boundary.....	140
10.3.3. Hypotheses	–
10.3.4. Dating of Deccan traps	141
Chapter 11. LATE MESOZOIC AND CENOZOIC INTERVALS OF MAGMATISM IN WESTERN NORTH AMERICA AND NORTHEASTERN AFRICA	143
11.1. North America	–
11.1.1. Stage of migration of acid-intermediate magmatism from a margin inward the continent (120–35 Ma).....	144
11.1.2. Stage of transition from acid-intermediate to basaltic magmatism (33–15 Ma)	146
11.1.3. Stage of predominantly basaltic volcanism (15–0 Ma)	147
11.1.4. Geodynamic models.....	148
11.2. Northeastern Africa	149
11.2.1. Dating of the oldest volcanic rocks from the Western Rift.....	150
11.2.2. Magmatism and rifting in the Red Sea–Ethiopia–Kenyan rift branch	152
11.2.3. Bilateral propagation of intracontinental rifting and magmatism	153
11.2.4. Geodynamics of the East African plateau.....	154
Chapter 12. LATE MESOZOIC AND CENOZOIC INTERVALS OF MAGMATISM IN CENTRAL AND EASTERN ASIA	156
12.1. The Albian	–
12.1.1. Radioisotope dates	–
12.1.2. Correlations	157
12.2. The Thanetian	158
12.2.1. Radiogenic isotope dates	–
12.2.2. Geodynamic setting of volcanism.....	159
12.3. The Middle-Late Cenozoic	161
12.3.1. Southern Primorye	–

12.3.2. Mongolia and adjacent southern East Siberian area	166
12.4. Hierarchy of Mesozoic through Cenozoic magmatic events	174
12.5. Synchronous and asynchronous magmatic intervals in Asia, western North America, and northeastern Africa	178
Section IV. ISOTOPE-GEOCHEMICAL HETEROGENEITY OF THE MANTLE AND CRUST	181
Chapter 13. SEPARATED (ORE) LEAD ISOTOPES	184
13.1. Models of lead evolution	—
13.1.1. One-stage models	—
13.1.2. Anomalous separated lead isotopes; Geiss parallelogram	185
13.1.3. Lead isotopes: parent-daughter or separated?	187
13.2. Lead isotopes from ore deposits of eastern Asia	—
Chapter 14. COMPLICATIONS AND INCONSISTENCIES IN INTERPRETING DATA ON Th,U-Pb ISOTOPE SYSTEM	190
14.1. Lead paradoxes	—
14.2. Discordia as a result of lead loss during metamorphism	191
14.3. Discordia as a result of radioactive accumulation combined with continual diffusion	193
Chapter 15. SOURCES OF CENOZOIC MAGMATIC ROCKS	198
15.1. Mixing diagrams	199
15.1.1. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ -1/Sr diagram	—
15.1.2. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram	203
15.2. Empirical isotope systematics of oceanic basalts	205
15.3. Ambiguous identification of end members of oceanic basalts in continental volcanic rocks	208
15.4. Lithospheric melts in continental volcanic rocks	209
15.5. Components of the lithosphere and sublithospheric convecting mantle in intraconti- nental volcanic rocks	—
15.5.1. Central Asia	210
15.5.2. Northeastern Africa	212
15.6. Components in volcanic rocks of ocean continent transition zone	214
15.6.1. Western margin of North America	215
15.6.2. Eastern margin of Asia	227
CONCLUSIONS	234
REFERENCES	236