

ГЕОХИМИЯ ИЗОТОПОВ

СОСТАВИТЕЛИ:

д.х.н. Шуколюков Ю.А., д.х.н. Поляков В.Б.

(с добавлениями д.г.-м.н. Ю.А.Костицына)

ЧАСТЬ I. ИЗОТОПНАЯ ГЕОХРОНОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ РАДИОГЕННЫХ ИЗОТОПОВ

1) Физические основы изотопной геохронологии

Закон радиоактивного распада как основа изотопной геохронологии. Физический смысл константы скорости радиоактивного распада, периода полураспада, среднего времени жизни атомов, зависимости между ними. Проблема постоянства скорости радиоактивного распада. Физический и геохимический методы определения констант скорости распада. Типы радиоактивности, используемые в изотопной геохронологии.

Основы изотопной масс-спектрометрии.

Основные системы масс-спектрометров: источник, анализатор и система регистрации.

Типы и принципы действия источников ионов: газофазный, твердофазный, с индуктивно-связанной плазмой, с лазерной абляцией, вторично-ионные источники.

Типы и принципы действия анализаторов: с секторным магнитом, времяпролетный и квадрупольный. Ускорительная масс-спектрометрия.

Магнитный анализатор масс-спектрометра: две основные функции – дисперсия по массам и фокусировка расходящихся пучков ионов. Уравнения, определяющие закономерности движения ионов в электростатическом и магнитном полях. Соотношение радиусов траекторий движения ионов в магнитном поле масс-спектрометра.

Системы регистрации. Два основных метода регистрации ионных токов в изотопных масс-спектрометрах: электрометрический усилитель и вторично-электронный умножитель. Одноколлекторные и многоколлекторные системы регистрации – особенности и области их применения.

Блок-схема изотопного магнитного масс-спектрометра. Основные параметры масс-спектрометров: разрешающая способность, диапазон масс, чувствительность, вероятная погрешность изотопного анализа.

Две основные задачи, решаемые с помощью масс-спектрометров в изотопной геохронологии: исследование изотопного состава и определение элементных концентраций. Метод изотопного разбавления.

Принцип действия ионного микрозонда, локальный изотопный анализ в изотопной геохронологии.

2) К-Аг метод изотопной геохронологии

Физические и геохимические основы К-Аг метода изотопной геохронологии.

Типы радиоактивного распада ^{40}K , определение констант скорости распада физическим и геохимическим методами. Изотопный состав калия и аргона. Расчет возраста с учетом двух типов радиоактивного распада ^{40}K : α -захвата и β -распада. Распространенность калия в породах и минералах.

Захваченный (избыточный) ^{40}Ar в минералах. Датирование К-Аг методом минералов с захваченным аргоном неизвестного изотопного состава: поправка на атмосферный аргон, изохронные варианты.

Сравнение устойчивости К-Аг изотопной системы при термических воздействиях на различные минералы (слюды, полевые шпаты, амфибол); энергия активации, плотность упаковки и дефекты как критерии сохранности и миграции радиогенного аргона в различных минералах.

Нейтронно-индукционный вариант калий-аргонового метода (метод ^{39}Ar - ^{40}Ar): принцип, генерация радиоактивных изотопов аргона при облучении минералов быстрыми нейтронами в ядерном реакторе. Интерпретация спектров ^{39}Ar - ^{40}Ar возрастов, преимущества, недостатки ^{39}Ar - ^{40}Ar метода изотопного датирования.

Применение К-Аг метода изотопной геохронологии.

Минералы, пригодные и не пригодные для датирования К-Аг методом. Датирование магматических пород калий-аргоновым методом. К-Аг геохронология осадочных и метаморфических пород; использование К-Аг возрастной "метки" для изучения переноса вещества осадочной оболочки Земли.

3) К-Са метод изотопной геохронологии

Сходство и различие геохимических особенностей пар Rb, Sr и K, Ca. Радиогенный кальций и изотопный состав обычного кальция. Особенности изотопного анализа кальция: изотопное масс-фракционирование кальция в природных условиях и в ходе масс-спектрометрических измерений. Изохронный вариант датирования К-Са методом.

4) Rb-Sr метод изотопной геохронологии

Физические основы и принципы Rb-Sr метода изотопной геохронологии. Изотопный состав современных рубидия и стронция. Особенности геохимического поведения рубидия и стронция. Основные представления об изотопной эволюции стронция в Солнечной системе и на Земле.

Понятие изохроны. Условия получения изохроны. Графическое представление Rb-Sr изохроны (по Николайсену, по Компстону-Джеффри). Да-

тирование открытых и замкнутых изотопно-геохимических систем изохронным методом.

Изохроны и линии смещения в Rb-Sr изотопной геохронологии. Эрохроны.

Особенности изотопного Rb-Sr датирования изверженных, метаморфических, осадочных пород, месторождений полезных ископаемых.

5) Sm-Nd метод изотопной геохронологии

Физические и геохимические основы Sm-Nd метода изотопной геохронологии.

Тип и скорость радиоактивного распада, современный изотопный состав самария и неодима и его эволюция в прошлом. Особенности геохимии Sm и Nd. Скорости генерации радиогенного ^{143}Nd , соответствующие требования к точности измерений, особенности масс-спектрометрического изотопного анализа неодима и самария (проблема изотопной масс-дискриминации). Эпсилон-обозначения.

Изохронные Sm-Nd датировки.

Геохимический смысл линейных зависимостей. Породы и минералы, пригодные для датирования Sm-Nd методом.

Модельный возраст. Значение модельного мантийного источника при расчёте модельного возраста. Одностадийная и двухстадийная модели.

Устойчивость Sm-Nd изотопной системы при метаморфических воздействиях. Минералы и породы, пригодные для Sm-Nd датирования.

6) Lu-Hf метод изотопной геохронологии

Изотопный состав лютеция и гафния, радиоактивные свойства лютеция. Особенности геохимии лютеция и гафния. Изохронный вариант датирования Lu-Hf методом. Требования к точности масс-спектрометрических измерений. Датирование докембрийских пород Lu-Hf методом.

Изотопная эволюция Hf. "Мантийная последовательность" в координатах $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Доказательства изотопной гетерогенности мантии Земли.

7) Геохимия радиогенных изотопов Sr, Nd, Hf

Радиогенные изотопы Sr и Nd в магматических породах. Сравнение геохимических свойств Sr, Rb, Sm, Nd. Первичный изотопный состав Sr и Nd; изотопы Sr и Nd в метеоритах – хондритах и ахондритах. Эволюция изотопного состава Sr и Nd метеоритов, Земли и Луны. Современный изотопный состав Sr и Nd в океанических и континентальных вулканических породах, возникших в различных геологических условиях. Применение первичного изотопного состава Sr и Nd для определения корового или мантийного генезиса пород, для установления единого или разного их источника. "Мантийная последовательность" для базальтовых пород срединно-

океанических хребтов, континентальных базальтов, островных дуг и континентальных окраин, континентальной коры.

Геохимия радиогенных изотопов Sr, Nd и Hf в осадочной оболочке.

Изотопные характеристики Sr и Nd в глубоководных осадках, оценки времени пребывания осадочных пород в коре, изотопный состав Sr и Nd в водах континентальной коры - реках и озерах. Использование изотопного состава Sr и Nd при исследовании процессов смешения природных вод, взаимодействия вода-порода в океанах. Эволюция изотопного состава Sr и Nd морских карбонатов (мирового океана) в фанерозойское и докембрийское время. Изотопный состав Sr и Nd современных океанов, причины постоянства изотопного состава Sr и вариаций в разных океанах ϵ_{Nd} .

8) U-Th-Pb метод изотопной геохронологии

Изотопный состав урана и тория, α -распад урана и тория, радиоактивные семейства. Принципы уран-торий-свинцового метода изотопной геохронологии. Два основных геохимических явления, приводящие к искажению рассчитываемых уран-торий-свинцовых возрастов: захват свинца при минералообразовании и миграция изотопов в ходе геологической истории.

Способы внесения поправки на захваченный при минералообразовании свинец при датировании изотопным U-Pb методом геохронологии.

Изохронные варианты U-Pb метода изотопного датирования для закрытых изотопно-геохимических систем. Датирование открытых изотопно-геохимических систем уран-свинцовым методом

Понятие дискордантных U-Pb возрастов. Датирование открытых изотопно-геохимических систем уран-свинцовым методом при условии "эпизодического метаморфизма" (методы Везерилла и Вассербурга).

Построение конкордии и дискордии, их взаимное расположение на диаграммах Везерилла и Вассербурга, положение экспериментальных точек в зависимости от вида миграции свинца и урана. Изотопная уран-свинцовая геохронология по цирконам и другим минералам, проблемы датирования по породам в целом.

Эволюция земного свинца и определение модельного возраста сульфидных месторождений Pb-Pb методом: методы Герлинга-Холмса-Хоутерманса, нормальные и аномальные свинцы, одностадийная и многостадийные модели эволюции изотопного состава свинца. Методы Стэйси-Крамерса, Каммингса-Ричардса. Датирование полевого шпата и пород в целом свинец-свинцовым методом.

9) Геохимия радиогенных изотопов свинца

Первичный изотопный состав свинца Солнечной системы и Земли. Эволюция изотопного состава свинца Земли. Одностадийные модели. Понятие геохроны. Аномальные свинцы. Двустадийные модели Стэйси и Крамерса, Камминга и Ричардса. Рудные свинцы. Корреляции между изотопным со-

ставом и величиной сульфидных месторождений. Многостадийная модель эволюции изотопного состава свинца. Особенности изотопного состава свинца молодых вулканических пород. Использование изотопного состава свинца в изучении техногенных загрязнений.

10) Уран-торий-гелиевый метод изотопной геохронологии

Изотопы гелия. Процессы накопления гелия в радиоактивных минералах. Основные уравнения, связывающие возраст минералов и концентрации урана, тория и гелия в радиоактивных минералах. Миграция гелия из минералов, связь сохранности радиогенного гелия с кристаллохимическими свойствами минералов: энергия активации миграции гелия, роль метамиктизации, влияние примесей. Избыточный гелий в минералах. Минералы, пригодные для датирования уран-торий-гелиевым методом.

11) Методы датирования, основанные на спонтанном делении урана

Уран-ксеноновый метод изотопной геохронологии. Представления о физических процессах при делении атомных ядер в минералах. Кривая выходов осколков деления. Генерация изотопов ксенона при спонтанном делении ^{238}U и нейтронно-индуцированном делении ^{235}U . Датирование U/Xe методом. Миграция ксенона в минералах. Нейтронно-индукционный вариант изотопного датирования по продуктам деления ($X_{\text{es}}/X_{\text{en}}$ -метод) – возможность датирования открытых изотопно-геохимических систем.

Метод изотопной геохронологии, основанный на регистрации следов (треков) осколков деления в структуре минералов. Механизм образования первичных треков. Выявление вторичных треков методом травления минералов. Определение возраста по соотношению концентрации урана и плотности треков, недостатки метода. Термическая устойчивость треков в разных минералах. Нейтронно-индукционный вариант метода определения возраста по трекам осколков деления. Минералы, пригодные для датирования по следам осколков деления. Применение метода треков при изучении термической и тектонической истории пород.

12) Методы изотопной геохронологии, основанные на распаде промежуточных членов радиоактивных рядов урана и тория

Понятие активности радиоизотопов. Методы измерения активности. Основные уравнения, связывающие активность изотопа – промежуточного члена радиоактивного семейства – и возраст. Определение скорости седиментации пелагических отложений иониевым и иониево-протактиниевым методами. Определение возраста морских биогенных карбонатов $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ и $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ методами. Принципы датирования по ^{210}Pb – хронология снега и льдов, графические методы расчета скорости накопления метеорных осадков. Определение возраста озерных и морских осадков. Зависимость активности ^{210}Pb от глубины в колонке. Изохроны в системе координат

$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th} - ^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$, датирование морских осадков. Нарушение радиоактивного равновесия в семействах ^{238}U и ^{235}U в вулканических породах.

13) Рений-осмиевый метод изотопной геохронологии

Изотопный состав рения и осмия, радиоактивные свойства рения. Особенности геохимии рения и осмия. Изохронный вариант рений-осмиевого метода изотопной геохронологии. Рений-осмиевое датирование молибденитов. Определение возраста метеоритов и земных мантийных пород. Эволюция изотопного состава земного осмия. Модельные возрасты пород. Метод рений-осмиевого датирования по обыкновенному осмию.

14) Методы геохронологии с использованием космогенных изотопов

Физические и геохимические основы радиоуглеродного метода изотопной геохронологии.

Принципы радиоуглеродного метода изотопного датирования: генерация радиоуглерода в тропосфере, механизмы переноса радиоуглерода в равновесный обменный резервуар Земли. Активность радиоуглерода в обменном резервуаре, ее вековые колебания, влияние на нее сжигания органического топлива и ядерных испытаний. Принципы методов измерения малых активностей и техника эксперимента в радиоуглеродном методе. Основное уравнение радиоуглеродного метода изотопной геохронологии, объекты датирования, диапазон возрастов.

Датирование грунтовых вод по тритию: генерация космогенного трития в атмосфере, процессы техногенного синтеза трития; определение возраста грунтовых вод по соотношению $^3\text{He}/^3\text{T}$.

Методы изотопной геохронологии, основанные на распаде космогенных ^{26}Al , ^{10}Be , ^{32}Si , ^{36}Cl , ^{39}Ar . Образование в атмосфере космогенных ^{26}Al , ^{10}Be , ^{32}Si , ^{36}Cl , ^{39}Ar ; время нахождения их в океане; определение возраста морских осадков и марганцевых конкреций, скорости их седиментации, датирование континентальных осадков, ледников, подземных вод, определение скорости эрозии поверхностных пород.

15) Возраст Земли и шкала геологического времени

Определение возраста Земли U/Pb , Rb/Sr , Sm/Nd , Re/Os методами изотопной геохронологии. U/Pb и Rb/Sr изотопные системы в изучении аккреции и ранней дифференциации Земли. Применение $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$ и $^{146}\text{Sm}/^{142}\text{Nd}$ изотопных систем с вымершими короткоживущими радиоактивными изотопами в изучении первых 100 млн. лет истории Земли. Изотопно-геохронологические исследования дифференциации Земли, эволюции земной коры. Представления о глобальной стандартной стратиграфической, геохронометрической, магнитостратиграфической временной шкалах. Особенности докембрийской временной шкалы.

16) Изотопная космохронология

Принципы определения возраста Вселенной по долгоживущим изотопам. Нуклеосинтез и вымершие изотопы. Принцип определения "формационного интервала" метеоритов по вымершим изотопам (^{129}I , ^{244}Pu , ^{26}Al , ^{107}Pd , ^{60}Fe , ^{53}Mn и др.). Внутренние Hf/W изохроны метеоритов как доказательства существования вымершего ^{182}Hf в ранней Солнечной системе. Исследование происхождения Луны с применением $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$ изотопной системы. Определения возраста Луны и метеоритов U/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd, Re/Os методами изотопной геохронологии. Калий-аргоновое изотопное датирование метеоритов и Луны. Понятие "времени удержания аргона". Изотопно-геохронологические доказательства единства происхождения тел Солнечной системы.

17) Геохимия радиогенных изотопов благородных газов

Первичные, космогенные, радиогенные изотопы благородных газов. Ядерные реакции в земной коре. Природный "ядерный реактор". Генерация изотопов благородных газов в земной коре. Соотношение $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$, $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ – "геохимические константы". Мантийные благородные газы. Первичные ^3He и ^{129}Xe в мантийных породах и воде океана. Применение благородных газов в изучении истории дегазации Земли и земной атмосферы. Вариации соотношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в породах и минералах мантийного происхождения. Изотопно-гелиевые характеристики геотектонических структур: изотопные вариации гелия в коровых породах на древних платформах, в орогенических поясах, в континентальных и океанических рифтовых зонах, в переходных областях океан-континент, в породах и флюидах океанических дуг и островов.

ЧАСТЬ II. ГЕОХИМИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ

1) Причины вариаций отношений стабильных изотопов в природе

Способы выражения изотопных вариаций (величины δ , Δ , α , связь между ними). Изотопные стандарты. Масс-спектрометрические методы исследования малых изотопных вариаций. Термодинамический (равновесный) изотопный эффект. Термодинамика изотопного обмена, понятие β -фактора и его связь с равновесным коэффициентом разделения изотопов α_e . β -фактор многозамещенных изотопных форм, правило геометрического среднего. Внутримолекулярный (интраструктурный) изотопный эффект. Методы расчетов β -факторов, теория Юри, Бигеляйзена-Майер.

Кинетический изотопный эффект. Природа кинетического изотопного эффекта. Скорости изотопных реакций, понятие переходного комплекса,

продуктоподобный и реагентоподобный переходные комплексы. Первичные и вторичные изотопные эффекты.

Сравнительный анализ влияния температуры и давления на термодинамический и кинетический изотопные эффекты. Зависимость коэффициентов изотопного фракционирования от разности масс изотопов, "правило плейд", масс-независимые и нелинейные изотопные эффекты.

Природа вариаций изотопного состава легких элементов во внеземном веществе (метеориты, Луна).

2) Геохимия изотопов водорода и кислорода

Изотопы кислорода и водорода в гидросфере и атмосфере. Процессы разделения изотопов водорода и кислорода в воде и водяном паре. Уравнение и линия Крэйга, связывающие изотопный состав водорода и кислорода. Изотопные вариации водорода и кислорода в снеге и льдах ледников. Принцип стратиграфии снега и льда по изотопному составу кислорода и водорода. Изотопный состав водорода и кислорода океанической воды. Палеотермометрия морей по изотопному составу карбонатов, кремнезема, фосфатов. Изотопы кислорода и водорода в геотермальных водах и рассолах, примеры генетических применений. Изотопы кислорода и водорода в литосфере: изотопное фракционирование кислорода в пороодообразующих минералах и магматических породах. Диапазон вариаций изотопного состава. Изотопные вариации кислорода при контаминации вулканических пород коровыми.

Принципы геотермометрии по изотопам кислорода: температурная зависимость коэффициентов фракционирования в системе минерал-вода ; функциональная зависимость между температурой и изотопным составом кислорода сингенетичных минералов. Примеры изотопно-кислородных геотермометров. Методы калибровки изотопных геотермометров, лабораторный, эмпирический (сравнение с минеральными геотермометрами), расчетный.

Особенности изотопного состава кислорода и водорода в гидротермальных месторождениях. Вариации изотопного состава кислорода в метаморфизованных породах, связь со степенью метаморфизма, температурные измерения по изотопам кислорода. Изотопы кислорода и водорода в осадочных породах, изотопная гетерогенность минеральных фаз. Изотопные вариации кислорода в каолините, монтмориллоните, глауконите, в карбонатах.

3) Геохимия изотопов углерода

Изотопный состав углерода. Многообразие химических форм углерода - восстановленная, окисленная, нейтральная. Основные процессы изотопного фракционирования - фотосинтез и изотопный обмен с карбонат-ионом.

Диапазон вариаций изотопного состава углерода на Земле. Изотопные вариации во внеземном веществе.

Изотопы углерода в современной биосфере. Особенности фракционирования изотопов в ферментативных реакциях понятие о термодинамически упорядоченном распределении изотопов. Общее представление о фракционировании изотопов углерода при фотосинтезе в растениях. Фракционирование изотопов C_3 и C_4 растениями. Процессы фракционирования в диагенезе. Изотопный состав терригенного и морского органического вещества. Органическое вещество аквагумусового типа. Фракционирование изотопов углерода в процессе катагенеза.

Изотопы углерода в горючих ископаемых. Использование изотопов углерода для идентификации нефтематеринских пород изотопные корреляции нефть-нефть, нефть-битумоид. Фракционирование изотопов углерода в процессах метанообразования, биогенный и термогенный метан в природных газах. Изотопные характеристики углерода в углях.

Эволюция изотопного состава углерода атмосферы – глобальные изменения изотопного состава атмосферного диоксида углерода за счет сжигания топлива. Осадочные докембрийские породы и изотопные вариации углерода в них. Связь с эволюцией биоты. Фракционирование изотопов углерода в системе CO_2 – карбонат, морские и пресноводные карбонаты.

Эндогенный углерод. Изотопный состав углерода карбонатитов и алмазов. Равновесие алмаз-графит. Вариации изотопного состава углерода в изверженных породах, ювенильных газах, в графите, мраморе.

Фракционирование углерода в метаморфических процессах. Геотермометр кальцит-графит. Фракционирование изотопов углерода в процессах гидротермального рудообразования – роль окислительно-восстановительных условий, упругости кислорода и других параметров в рудонесущем флюиде.

4) Геохимия изотопов серы

Изотопный состав серы. Диапазон вариаций изотопного состава сера на Земле и во внеземном веществе. Два основных типа изотопного фракционирования серы: восстановление сульфат-иона и реакции изотопного обмена. Многообразие окислительно-восстановительного состояния серы - условие изотопного фракционирования. Общее представление о стадиях и условиях биологического фракционирования изотопов серы - бактериальной сульфатредукции. Факторы, влияющие на степень биологического изотопного фракционирования. Изотопные вариации серы в современных осадочных породах - в морских и озерных осадках, в сульфидах и сульфатах, в нефтях, в углях, в самородной сере. Генетические реконструкции. Геохимия изотопов серы в осадочных породах докембрийского возраста - роль в исследовании биологической эволюции в архее. Изотопная эволюция морских сульфатов. Изотопный состав серы сульфидов месторожде-

ний (осадочных, изверженно-гидротермальных, стратиформных и др.).
 Изотопы серы в рудообразующих флюидах: фракционирование между различными химическими формами серы, связь с температурой, pH, f_{O_2} , возможности реконструкции условий рудообразования. Изотопный состав серы в магматических породах. Причины вариаций изотопного состава – сульфатредукция, контаминация серой морской воды, улетучивание SO_2 .
 Изотопный состав серы в атмосфере. Применения при изучении уровня загрязнения окружающей среды. Сульфиды как изотопные геотермометры.

5) Геохимия изотопов азота

Изотопный состав азота. Изотопы азота в изверженных породах, в метеоритах, в лунном грунте, в мантии Земли. Изотопы азота в магматических породах: формы нахождения, диапазон вариаций изотопного состава. Азот в алмазах. Изотопные характеристики метаморфических пород. Связь изотопного состава со степенью метаморфизма. Изотопные вариации азота в гидросфере и осадочной оболочке, механизмы фракционирования при улетучивании аммиака и молекулярного азота, растворении в воде. Изотопы азота в горючих ископаемых: механизмы изотопного фракционирования. Изотопы азота в биосфере: в растениях, в животных, в грунтовых водах, в морях. Кинетические изотопные эффекты при биохимических реакциях нитрификации и денитрификации.

Фракционирование изотопов селена, кремния, бора, лития, калия, магния, кальция.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНАЯ:

1. Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л., ЛГУ. 1987.
2. Верховский А.Б., Шуколюков Ю.А. Элементное и изотопное фракционирование благородных газов в природе. М., "Наука". 1991.
3. Галимов Э.М. Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования. // Геохимия. 1984. № 8. С. 1091-1115.
4. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. М., "Недра". 1968.
5. Галимов Э.М. и Кодина Л.А. Исследование органического вещества и газов в осадочных отложениях дна Мирового океана. М. Наука. 1984.
6. Галимов Э.М. Изотопный метод выявления нефтематеринских отложений на примере месторождения ряда регионов СССР // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1986. № 4. С. 3 - 12.
7. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М.: Недра. 1973.

8. Галимов Э.М. Источники и механизмы образования углеводородных газов в осадочных породах // Геохимия. 1989. №2. С. 163 - 180.
9. Галимов Э.М. Природа биологического фракционирования изотопов углерода. М., "Наука". 1981.
10. Галимов Э.М., Поляков В.Б. О термодинамически упорядоченном распределении изотопов углерода в биогенных геохимических объектах. // Геохимия. 1990. № 9. 1232 – 1240.
11. Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека. М., "Наука". 1983.
12. Горохов И.М. Рубидий-стронциевый метод изотопной геохронологии. М., "Энергоатомиздат". 1985.
13. Гриненко В.А., Гриненко Л.Н. Геохимия изотопов серы. М., "Наука", 1974. ред. В.И.Смирнов.
14. Купцов В.М. Методы хронологии четвертичных отложений океанов и морей. М., "Наука". 1989.
15. Мамырин Б.А., Толстихин И.Н. Изотопы гелия в природе. М., "Энергоиздат". 1981.
16. Прасолов Э.М. Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Л., "Недра". 1990.
17. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. МГУ. 2000.
18. Флайшер Р.Л., Прайс П.Б., Уокер Р.М. Треки заряженных частиц в твердых телах. М., "Энергоиздат". 1981.
19. Фор Г. Основы изотопной геологии. М., "Мир". 1989.
20. Харланд У.Б. и др. Шкала геологического времени. М., "МИР". 1985.
21. Хёфс Р. Геохимия стабильных изотопов. 1986.
22. Шуколюков Ю.А. Продукты деления тяжелых элементов на Земле. М., "Энергоиздат". 1982.
23. Galimov E.M. Isotope fractionation related to kimberlite magmatism and diamond formation. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 1697 - 1708.
24. Galimov E.M. Sources and mechanisms of formation of gaseous hydrocarbons in sedimentary rocks. // Chemical Geology. 1988. V.71 p. 77-95.
25. Polyakov V.B., Kharlashina N.N. Effect of pressure on the equilibrium isotopic fractionation. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. V. 58. P. 4739-4750.
26. Stable Isotopes. Natural and Anthropogenic Sulphur in the Environment. (eds. Krouse H.R., Grinenko V.A.) 1990. SCOPE Publ. by John Wiley and Sons Ltd. 425 p.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ:

- 27.Бродский А.И. Химия изотопов М.: Наука. 1957. 645 с.
- 28.Варшавский Я.М. и Вайсберг С.Э. Термодинамические и кинетические особенности реакций изотопного обмена. // Успехи химии. 1957 Т. 26. С. 1434 - 1468.
- 29.Войткевич Г.В. Краткий справочник по геохимии. М., "Недра". 1977.
- 30.Галимов Э.М. О концепции термодинамического распределения изотопов в биологических системах и ошибках, связанных с ее пониманием. // Геохимия. 1978. № 10 с.1570.
- 31.Изотопная геохимия процессов рудообразования. Ред.Ю.А.Шуколюков, М., "Наука". 1988.
- 32.Костицын Ю.А., Вагин С. Л. Экспериментальные исследования миграционной способности радиогенного стронция. // Геохимия. 1993. № 5. С. 47-57.
- 33.Костицын Ю.А., Русинова С. В. Rb-Sr изохронное датирование калишпатового сферолита из вулканической толщи серебро-полиметаллического месторождения Канимансур (Ср. Азия). // Изотопное датирование эндогенных рудных формаций. М. 1993. С. 103-111.
- 34.Костицын Ю.А. Rb-Sr изотопные исследования месторождения Мурунтау. Датирование рудных жил Rb-Sr изохронным методом. // Геохимия. 1993. № 9. С. 1308-1318.
- 35.Костицын Ю.А. Rb-Sr изотопные исследования месторождения Мурунтау. Рудоносные метасоматиты. // Геохимия. 1994. № 4. С. 486-497.
- 36.Костицын Ю.А. Rb-Sr изотопные исследования месторождения Мурунтау. Магматизм, метаморфизм и рудообразование. // Геохимия. 1996. № 12. С. 1123-1138.
- 37.Меландер Л., Сондерс У. Скорости реакций изотопных молекул. М.: Мир. 1983.
- 38.Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. М., "Мир", 1977. ред.М.В.Иванов, Дж.Р.Френей.
- 39.Старик И.Е. Ядерная геохронология. М.-Л., "АН СССР". 1961.
- 40.Тугаринов А.И., Войткевич Г.В. Докембрийская геохронология материков. М., "Недра". 1966.
- 41.Шуколюков Ю.А., Горохов И.М., Левченков О.А. Графические методы изотопной геологии. М., "Недра". 1974.
- 42.Шуколюков Ю.А., Левский Л.К. Геохимия и космохимия изотопов благородных газов. М., "Атомиздат". 1972.
- 43.Hofmann A.W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. // Nature. 1997. 385: 219-229.

44. Tatsumoto M., Unruh D.M., Patchett P.J. U-Pb and Lu-Hf systematics of Antarctic meteorites. // Proc. 6th Symp. Antarctic Meteorites. Natl. Inst. Polar Res. Tokyo. 1981. P.237-249.
45. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell. Oxford. 1985. 312 P.
46. Zindler A., Hart S. Chemical Geodynamics. // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1986. 14: 493-571.