

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

ПРИНЯТО
Ученым советом ИГХ СО РАН
Протокол № 5 от 15.02.2023 г.
Директор ИГХ СО РАН
д.г.-м.н. А. Б. Перепелов

ПРОГРАММА

кандидатского экзамена по научной специальности

**1.6.4 МИНЕРАЛОГИЯ, КРИСТАЛЛОГРАФИЯ.
ГЕОХИМИЯ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Иркутск, 2023

Введение

Настоящая программа охватывает основные разделы минералогии, кристаллографии, геохимии и геохимических методов поисков полезных ископаемых: основные этапы истории и направления их современного развития, применяемые методы исследований, связь с другими геологическими науками, научное и практическое значение, а также базовые сведения по физике кристаллов, генетической минералогии, общей геохимии, геохимии отдельных элементов, физической геохимии, геохимии изотопов, геохронологии и экологической геохимии.

Программа разработана кафедрой геохимии геологического факультета МГУ и одобрена экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по наукам о Земле.

1. Кристаллография и кристаллохимия

Геометрическая кристаллография

Пространственная решетка как фундамент геометрической теории строения кристаллов. Основные законы кристаллографии в свете решетчатого строения кристаллов.

Операции и элементы симметрии I и II рода. Осевая теорема Эйлера, ее обобщенное представление и частные случаи, ее использование при выводе групп симметрии. Различные способы представления симметрических операций: модельный, координатный, матричный. Алгоритм вывода 32 точечных групп симметрии.

Кристаллографические координатные системы, категории, сингонии. Распределение 32 кристаллографических классов по шести сингониям и трем категориям. Международная символика (символика Германа-Могена) точечных групп симметрии.

Морфология кристаллов. Простые формы кристаллов, их характеристики. Понятия «облик» и «габитус» кристалла. Символы граней и ребер кристаллов, их определение и взаимосвязь. Закон Вейса (закон зон) и его использование при определении символов ребер и граней кристаллов. Симметрия и форма реальных кристаллов. Принцип Кюри. Геометрический отбор. Закономерные и незаконные сростания кристаллов. Использование микрорельефа граней, фигур травления для уточнения точечной группы кристалла.

Физические свойства кристаллов: скалярные, векторные, тензорные. Структурно-чувствительные свойства кристаллов.

Типы решеток Браве, их вывод. Понятие «элементарная ячейка». Симметрия решеток Браве. Трансляционные элементы симметрии.

Пространственные (федоровские) группы симметрии, их обозначения. Принципы вывода и построения графиков пространственных групп. Группы симморфные, асимморфные, гемисимморфные. Генетическая связь между федоровскими группами различных сингоний.

Правильные системы точек, их основные характеристики.

Преобразование кристаллографических координатных систем, символов граней и координат точек (атомов).

Группы антисимметрии – группы черно-белой симметрии, принципы их вывода. 58 точечных групп антисимметрии, их применение при описании двойников кристаллов.

Квазикристаллы. Фуллерены. Нанотрубки.

Основные положения теоретической кристаллохимии

Основные и промежуточные типы химической связи. Потенциальная кривая химической связи. Классификация кристаллических структур по типам химической связи и структурным группировкам. Принципы теории плотнейшей упаковки. Изображение структурных типов с помощью полиэдров. Основные структурные типы.

Орбитальные радиусы атомов и ионов. Радиусы ионов в кристаллах. Потенциалы ионизации и родство к электрону. Электроотрицательность. Кислотно-основные свойства атомов и ионов.

Электронная структура переходных элементов. Расщепление энергии *d*- и *f*-уровней в кристаллическом поле различной симметрии. Понятие об энергии предпочтения координации.

Основной закон кристаллохимии Гольдшмидта. Критерии устойчивости структурного типа. Правила Полинга для ионных кристаллов. Правила устойчивости структурных типов ковалентных и существенно ковалентных кристаллов. Правило октета. Правило Юм-Розери. Правила Партэ. Числовые законы строения сульфидов и сульфосолей (по Н.В. Белову).

Структурная гомология. Гомологические ряды. Производные и вырожденные структуры. Фазы вычитания и внедрения.

Полиморфизм как общее свойство кристаллических веществ. История открытия полиморфизма как явления. Классификация полиморфизма. Полиморфные переходы первого и второго рода. Структурные аспекты явления полиморфизма.

Политипия. Отличие политипии от полиморфизма. Способы описания политипных структур.

Изоморфизм. Изоморфизм и изоструктурность. Изодиморфизм. Классификация изоморфизма. Его соотношение с твердыми растворами. Классические правила изоморфизма Гольдшмидта-Ферсмана. Основы количественной теории изоморфизма.

Изоморфизм как функция температуры и давления. Распад изоморфных смесей при понижении температуры и повышении давления.

Рост и морфология кристаллов

Кристаллообразование в гомогенных средах. Фазовые равновесия и переходы. Кристаллизация как фазовый переход. Диаграммы состояния систем. Поверхностная энергия. Движущая сила кристаллизации и способы ее выражения. Работа, необходимая для формирования кристаллической фазы. Энергия активации. Флуктуационная природа зародышеобразования и его особенности в парах и конденсированных средах. Геометрическая модель образования зародышей.

Механизм роста совершенных кристаллов. Кристаллизация в гетерогенных средах. Двумерные зародыши. Их размер и форма. Эпитаксия. Анизотропия поверхностной энергии. Структура границы раздела фаз. Адсорбционный слой. Нормальный и послыйный рост кристаллов. Условия их реализации. Анизотропия скоростей послыного роста грани.

Тепло- и массоперенос при кристаллизации. Диффузионные и поверхностные процессы. Кинетический и диффузионный режим кристаллизации. Внешняя форма и однородность реальных кристаллов. Кристаллохимически обусловленная форма кристалла. Метод ПЦС Хартмана. Типы граней кристаллов. Современная трактовка равновесной формы. Метод средних работ отрыва Странского и Каишева. Формы роста. Корреляция между теоретически возможными, равновесными формами и формами роста кристаллов. Скелетные формы. Нитевидные кристаллы. Расщепление кристаллов. Сферолиты. Ортотропизм. Ритмический рост. Геометрический отбор.

Влияние точечных дефектов на рост и морфологию кристаллов. Физическая и химическая адсорбция примесей. Гомогенный и гетерогенный захват. Равновесное и неравновесное распределение примесей при кристаллизации. Эффективные коэффициенты распределения. Концентрационное переохлаждение. Секториальное и зонарное строение кристаллов. Дислокации как источники слоев роста. Формирование двойников. Дефекты упаковки. Границы блоков. Температурные напряжения. Гетерогенные включения маточной среды и посторонних частиц.

Общая характеристика методов искусственного получения кристаллов. РТХ-диаграммы состояния систем. Условия управляемой кристаллизации. Критерии выбора и общая классификация методов выращивания кристаллов.

Выращивание кристаллов из растворов. Типы растворителей. Фазовые диаграммы и кривые растворимости. Разновидности методов.

Раствор-расплавная кристаллизация, ее возможности и разновидности. Расплавы-растворители. Разбавленные и высококонцентрированные системы. Основные модификации, технические приемы и перспективы развития.

Гидротермальный синтез. Свойства гидротермальных растворов. Выращивание кристаллов при температурном градиенте, другие методы. Кристаллизация при обычном давлении и умеренной температуре (до 100 °С). Приемы изменения температуры раствора. Методы температурного перепада. Рост кристаллов при вынужденной конвекции раствора. Испарение растворителя. Кристаллизация при постоянной температуре и постоянном пересыщении. Использование возможностей химических и электрохимических реакций. Методы со встречной диффузией. Кристаллизация в гелях.

Выращивание кристаллов из газовой (паровой) среды. Физическая конденсация. Химические транспортные реакции. Представление о ПЖК-механизме кристаллизации. Особенности получения объемных, нитевидных кристаллов и эпитаксиальных пленок.

Сравнительная морфология минералов и их синтетических аналогов. Общие и отличительные признаки минералов и искусственных кристаллов. Структурные и механические примеси в минералах и их влияние на внешнюю и внутреннюю морфологию. Включения: твердые, жидкие, однофазные, двухфазные, трехфазные и более сложные. "Минералы-узники". Примеры генетической интерпретации экспериментальных данных.

Рентгенография минералов и рентгеноструктурный анализ

Физические основы рентгенографии кристаллов. Открытие и свойства рентгеновских лучей. Сплошной и характеристический спектры. Рентгеновские трубки. Поглощение рентгеновских лучей и выбор рентгеновского излучения. Применение фильтров для монохроматизации рентгеновских лучей.

Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. Модель дифракции как отражение рентгеновских лучей от атомных плоскостей. Уравнение Брэгга-Вульфа.

Подходы к решению задач в процессе рентгенографического исследования минералов. Применение рентгенографии для исследования микронапряжений в кристаллах и определения размеров частиц в образце.

Прецизионное определение параметров элементарных ячеек. Причины небольших изменений параметров элементарной ячейки. Влияние примесей на изменение параметров. Установление связи параметр

– состав. Зависимость изменения параметров ячейки от условий кристаллизации. Линейный регрессионный анализ изменений параметров.

Определение состава и структурных особенностей минералов по рентгенографическим данным (отношение S/As в арсенопирите и его типоморфная роль; оценка содержания различных металлов в пирротине; изоморфизм в кварце и его петрогенетическое значение и др.). Исследование изоморфизма, полиморфизма и полиитипии в минералах (на примере представителей глинистых и полевых шпатов) и его петрогенетическое значение.

Применение рентгенографии для решения задач качественного и количественного анализа кристаллов. Диагностика мономинеральных фаз и качественный рентгенофазовый анализ смесей химических соединений и минералов. Определители фаз. Базы рентгеновских данных (программа «minerals»). Индексирование рентгеновских спектров (программы XLAT, ind, krist).

Количественный фазовый анализ. Факторы, влияющие на соотношение интенсивностей рефлексов в полифазном образце. Определение соотношения фаз в двухкомпонентной смеси.

Применение рентгеновской дифракции для решения современных проблем структурной минералогии: а) кристаллохимической систематики минералов; б) изучения структурных перестроек в глубинных геосферах; в) исследования важнейших явлений в реальной структуре минералов – изоморфизма, полиморфизма, полиитипии, модуляции и др.

Структура и свойства кристаллов

Окраска кристаллов. Избирательное поглощение, как причина появления окраски. Интерпретация природы окраски минералов в рамках зонной теории, теории молекулярных орбиталей и теории кристаллического поля.

Оптические свойства кристаллов. Природа световых лучей и основные понятия кристаллооптики. Связь поляризуемости атомов со значением показателя преломления. Влияние структурных особенностей на оптические свойства кристаллов. Жидкие кристаллы: природа анизотропии их свойств.

Особенности состава и строения люминесцентных и лазерных кристаллов.

Магнитные свойства кристаллов. Магнитный момент электрона и атома. Особенности магнитных свойств кристаллов (диамагнетика, парамагнетика, ферромагнетика, антиферромагнетика, ферримагнетика). Магнитная симметрия кристаллов.

Сегнетоэлектрические свойства кристаллов. Поляризация кристаллов. Линейные пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, антисегнетоэлектрики. Симметрия полярных кристаллов. Связь полупроводниковых свойств с кристаллической структурой.

Сверхпроводимость кристаллов. Структурные особенности оксидных сверхпроводников нового поколения.

2. Минералогия

Общая часть

Современная минералогия как наука, ее содержание и задачи. Понятие о минерале. Основные этапы истории развития минералогии. Связь минералогии с другими науками. Основные направления в современной минералогии. Научное и практическое значение современной минералогии.

Морфология минералов и минеральных агрегатов. Облик и габитус кристаллов. Скрытокристаллические агрегаты, конкреции, секреции и др. Твердые и газово-жидкие включения в минералах. Псевдоморфозы. Понятие об онтогении минералов.

Физические свойства минералов: цвет, черта, блеск, прозрачность, твердость, спайность, удельный вес, магнитность, электропроводность, люминесценция, радиоактивность и др. Связь физических свойств с составом, структурой и условиями образования минералов (типоморфизм). Природа окраски минералов.

Химический состав минералов. Минералы как многокомпонентные системы переменного состава. Типы химической связи в минералах (ионная, ковалентная, металлическая, межмолекулярная). Атомные и ионные радиусы. Координационные числа и координационные многогранники. Изоморфизм. Типы изоморфных замещений. Структурное упорядочение. Твердые растворы и их распад. Полиморфизм. Полиитипия. Смешанослойные структуры. Метамиктные минералы. Аморфное, стеклообразное и коллоидное состояние вещества. Расчет кристаллохимических формул минералов. Изображение многокомпонентных систем на плоскости.

Происхождение и изменение минералов в природе. Понятие о процессах минералообразования: магматическом; пегматитовом, пневматолитовом, гидротермальном, метаморфическом (в том числе ударном), метасоматическом, гипергенном. Распространенность минералов в земной коре и мантии. Подразделение минералов на породообразующие, акцессорные, рудные, редкие и вторичные.

Современные методы исследования состава и структуры минералов: методы спектроскопии твердого тела, рентгенофазового, рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов, электронной микроскопии высокого разрешения и др. Полевые методы диагностики минералов.

Описание минералов

Принципы, лежащие в основах современных классификаций минералов. Кристаллохимическая систематика минералов. Минеральные виды и разновидности.

Самородные элементы. Общая характеристика и условия образования в природе. Металлы: медь, серебро, золото, элементы платиновой группы, самородное железо, камасит, тэнит. Полуметаллы: мышьяк, сурьма, висмут. Неметаллы: алмаз, графит, лонсдейлит, сера.

Сульфиды и их аналоги. Общая характеристика и условия образования в природе. Основы систематики сульфидов и их аналогов. Простые сульфиды и их аналоги: аргентит, акантит, халькозин, галенит, сфалерит, вюртцит, киноварь, пентландит, троилит, пирротин, никелин, антимонит, висмутин, аурипигмент, молибденит, реальгар, шмальтин. Двойные сульфиды: халькопирит, станнин, борнит, ковеллин. Дисульфиды и их аналоги: пирит, кобальтин, марказит, арсенопирит. Сложные сульфиды и их аналоги: блеклые руды, пираргирит, прустит, буланжерит, джемсонит.

Оксиды и гидроксиды. Общая характеристика и условия образования в природе. Основы систематики оксидов и гидроксидов. Простые оксиды: куприт, периклаз, вюстит, корунд, гематит, рутил, брукит, анатаз, касситерит, пиролюзит, уранинит, минералы группы кремнезема (кварц, тридимит, кристобалит, коэсит, стишовит, опал). Сложные оксиды: хризоберилл, минералы группы шпинели (шпинель, герцинит, ганит, магнетит, магнезиоферрит, яковсит, франклинит, титаномагнетит), ильменит, перовскит, минералы группы танталониобатов (пироклор, колумбит, танталит, самарскит, эшинит). Гидроксиды: брусит, гидраргиллит, диаспор, бемит, гетит, лепидокрокит, манганит, псиломелан; сложные минеральные смеси: лимониты, бокситы, вады.

Галогениды. Общая характеристика и условия образования в природе. Флюорит, криолит, галит, сильвин, виллиомит, карналлит.

Карбонаты. Общая характеристика и условия образования в природе. Карбонаты без дополнительных анионов и кристаллизационной воды: кальцит, родохрозит, сидерит, магнезит, смитсонит, арагонит, стронцианит, витерит, церуссит, доломит, анкерит. Карбонаты с дополнительными анионами: малахит, азурит. Карбонаты с кристаллизационной водой: термонатрит, сода, трона.

Сульфаты. Общая характеристика и условия образования в природе. Сульфаты без дополнительных анионов и кристаллизационной воды: барит, целестин, англезит, ангидрит, тенардит. Сульфаты с дополнительными анионами: алунит, ярозит, брошантит. Сульфаты с кристаллизационной водой: гипс, мирабилит.

Фосфаты, арсенаты и ванадаты. Общая характеристика и условия образования в природе. Безводные фосфаты без дополнительных анионов: ксенотим, монацит. Безводные фосфаты, арсенаты и ванадаты с дополнительными анионами: апатит, пироморфит, ванадинит. Водные фосфаты, арсенаты и ванадаты: вивианит, эритрин, аннабергит, скородит, бирюза, минералы группы урановых слюдок (отенит, торбернит, карнотит, тюямунит).

Вольфраматы, молибдаты и хроматы. Общая характеристика и условия образования в природе. Шеелит, повеллит, вульфенит, минералы группы вольфрамита (гюбнерит-ферберит), ферримоллибдит, крокоит.

Бораты. Общая характеристика и условия образования в природе. Типы анионных группировок и классификация боратов. Общая характеристика и условия образования в природе. Островные бораты: ссайбелиит (ашарит), людвицит, бура. Цепочечные бораты: гидроборатит, улесит, пандермит. Каркасные бораты: борацит.

Силикаты. Современное представление о структурных типах силикатов. Представление об алюмо-, боро-, берилло-, титано- и цирконосиликатах. Основы современной кристаллохимической классификации силикатов. Островные силикаты. Общая характеристика и условия образования в природе. Островные силикаты с изолированными кремнекислородными тетраэдрами без добавочных анионов: фенацит, виллемит, минералы группы оливина (изоморфные ряды форстерит-фаялит-тефроит), минералы группы гранатов (пироп, альмандин, спессартин, гроссуляр, андрадит, уваровит, Ti- и Zr- содержащие гранаты – меланит, шорломит, кимцеит; гидрогранаты), циркон, торит, коффинит. Островные силикаты с изолированными кремнекислородными тетраэдрами и добавочными анионами: кианит, андалузит, силлиманит, ставролит, топаз, титанит, хлоритоид. Островные силикаты со сдвоенными кремнекислородными тетраэдрами (диортосиликаты) и добавочными анионами: ильваит, каламин, лампрофиллит. Островные силикаты с изолированными и сдвоенными кремнекислородными тетраэдрами, содержащими добавочные анионы: цоизит, эпидот, алланит, пьомонит, везувиян. Островные силикаты кольцевого типа: берилл, кордиерит, диоптаз, турмалин, эвдиалит.

Цепочечные силикаты. Общая характеристика и условия образования в природе. Основы классификации пироксенов. Особенности кристаллических структур пироксенов и пироксеноидов. Вариации химических составов пироксенов; пироксеновая трапеция. Ромбические пироксены: минералы ряда энстатит-ферросилит. Моноклинные пироксены: минералы ряда клиноэнстатит-клиноферросилит, минералы ряда диопсид-геденбергит, авгит, омфацит, эгирин, жадеит, сподумен. Пироксеноиды: волластонит, родонит.

Ленточные силикаты. Общая характеристика и условия образования в природе. Подходы к современной классификации амфиболов. Ромбические амфиболы: антофиллит, жедрит. Моноклинные амфиболы: минералы ряда тремолит-актинолит, роговые обманки; амфиболовые асбесты.

Слоистые силикаты и алюмосиликаты, основы их классификации. Общая характеристика и условия образования в природе. Типы сеток в структуре слоистых силикатов; смешанослойные силикаты. Силикаты с двухслойным пакетом: каолинит, дикиит, накрит, галлуазит, минералы группы серпентина (антгорит, лизардит, хризотил). Силикаты с трехслойным пакетом: тальк, пирофиллит, слюды (мусковит, парагонит, флогопит, биотит, лепидомелан, лепидолит, циннвальдит), хрупкие слюды (маргарит), гидрослюды (гидромусковит, вермикулит, глауконит), монтмориллонит, нонтронит, сапонит. Силикаты с четырехслойным пакетом: минералы группы хлоритов (пеннин, клинохлор, прохлорит, шамозит, кочубеит). Пренит, апофиллит.

Каркасные силикаты. Общая характеристика и условия образования в природе. Каркасные алюмосиликаты без добавочных анионов: полевые шпаты (калиевые полевые шпаты – ортоклаз, микроклин, адуляр, санидин; плагиоклазы – альбит, олигоклаз, андезин, лабрадор, битовнит, анортит; бариевые полевые шпаты – целезиан, гялофан), лейцит, поллудит, нефелин. Каркасные алюмо- и бериллосиликаты с добавочными анионами: минералы группы скаполита (мейонит – мариалит), канкринит, содалит, лазурит, минералы группы гельвина (гельвин, даналит, гентгельвин). Водосодержащие каркасные алюмосиликаты без добавочных анионов (цеолиты): натролит, анальцит, шабазит, стильбит (десмин), гейландит, клиноптилолит, морденит.

Природные ассоциации минералов

Магматические минеральные ассоциации. Понятие о магме, ее состав. Дифференциация магмы при ее остывании. Отделение летучих от магматического расплава. Ликвация и кристаллизационная дифференциация. Последовательность выделения главных силикатных минералов. Общие схемы отделения и концентрации рудных минералов при магматическом процессе. Типичные минеральные ассоциации, связанные с основным и ультраосновным типами магмы. Минеральные ассоциации в месторождениях алмаза, хромита, титаномagnetита, платиноидов, апатита. Понятие о карбонатах, их минеральный состав и различные представления о генезисе.

Минеральные ассоциации пегматитов. Понятие «пегматит» и общая характеристика пегматитового процесса. Развитие учения о генезисе пегматитов в работах А.Е. Ферсмана, его последователей и оппонентов. Роль летучих при образовании пегматитов. Температурная градуировка пегматитового процесса. Изменение состава последовательно кристаллизующихся минералов в пегматитовых образованиях. Роль метасоматических процессов. Минеральный состав гранитных пегматитов. Типы структур и текстур; характеристика главных зон. Общая схема классификации гранитных пегматитов, характерные минеральные ассоциации, структурно-текстурные особенности и отдельные типы. Щелочные пегматиты – сиенитовые и нефелин-сиенитовые.

Минеральные ассоциации скарнов. Общая характеристика контактово-метасоматических процессов минералообразования. Роль летучих, надкритических растворов и гидротермальных процессов. Различные типы минеральных образований при метасоматических процессах. Известковые и магнезиальные скарны. Образование минералов и минеральных ассоциаций в скарнах. Гидротермальные изменения скарновых минералов. Типичные для скарнов ассоциации рудных минералов.

Минеральные ассоциации альбититов и грейзенов. Понятия «альбитит» и «грейзен». Физико-химические условия образования. Геохимическая и минералогическая характеристика. Зональность грейзеновых и связь с гидротермальными ассоциациями.

Гидротермальные минеральные ассоциации. Связь гидротермальных растворов с магматическими очагами. Способы переноса и отложения вещества в гидротермальных растворах. Роль коллоидов в отложении минералов гидротермальных ассоциаций; признаки, указывающие на отложение минералов из коллоидных систем. Типичные минеральные ассоциации в гидротермальных образованиях. Типы минеральных ассоциаций и их связь с глубиной образования. Минеральные ассоциации безрудных гидротермальных образований (цеолитный процесс).

Минеральные ассоциации гипергенных процессов. Общие условия и факторы, определяющие характер гипергенных процессов. Условия и закономерности образования минералов при выветривании сульфидных минеральных ассоциаций. Зональность зоны окисления, причины зональности. Минеральный парагенезис окисления руд свинцово-цинковых и медных месторождений. Условия и закономерности образования минералов в коре выветривания пород. Стадийное гидрохимическое выветривание минералов. Минералы, образующиеся в коре выветривания и остаточные минералы. Профиль коры выветривания и характеристика минеральных ассоциаций в главных зонах на примере коры выветривания ультраосновных и глиноземистых пород. Латеритный тип выветривания (бокситизация). Механическая и гидрохимическая дифференциация вещества при минералообразовании в осадках. Россыпи и их важнейшие минеральные ассоциации. Минералы, образующиеся при биогенных процессах осадконакопления.

Минеральные ассоциации метаморфических образований. Краткая физико-химическая характеристика процессов образования минералов при региональном метаморфизме. Понятие о зонах глубинности. Особенности структур и минеральных агрегатов при метаморфизме. Типичные минеральные ассоциации в различных по исходному составу метаморфических породах. Примеры минеральной ассоциации в метаморфических месторождениях: железистые кварциты, силлиманит-дистеновые породы,

месторождения наждака, корунда, графита, окисно-силикатных марганцевых руд. «Альпийские» жилы. Ударный (импактный) процесс минералообразования. Фазы высокого давления.

3. Геохимия

Объект геохимии

Определение геохимии. Атомы химических элементов в природе, основные проблемы геохимии: распространенность химических элементов и распределение их в природе. Возникновение геохимии. основополагающие работы Ф.У. Кларка, В.И. Вернадского, В.М. Гольдшмидта, А.Е. Ферсмана. Основные тенденции развития геохимии во второй половине XX века. Основные труды по геохимии.

Место геохимии в системе наук о Земле.

Методы геохимических исследований (аналитическая геохимия)

Химико-аналитические, физико-химические и физические методы изучения содержания и состояния элементов в природных объектах.

Значение и соотношение методов термодинамики (физической химии) и кристаллохимии (физики твердого тела) в геохимии. Роль физико-химического эксперимента.

Математические методы обработки геохимических данных и ЭВМ-моделирования.

Проблема распространенности химических элементов в природе

Определение понятия распространенности элемента; способы выражения распространенности. Понятие о содержании элемента в объекте как случайной величине; вид функций распределения содержания элементов в объектах, понятие о среднем содержании и дисперсии содержаний в однородных объектах. «Случайное» (стохастическое) и пространственно-упорядоченное (детерминированное) распределение элементов.

Основные формы состояния вещества во Вселенной: звезды, рассеянная материя, холодные тела, излучения, проблема «скрытой массы» галактик.

Понятие космической распространенности элементов

Распространенность элементов на Солнце. Методы оценки. Основные закономерности распространенности нуклидов в зависимости от атомного номера. Процессы нуклеосинтеза и основные типы ядерных реакций. Радиоактивные ядра. Понятие о возрасте химических элементов. Эволюция звезд и их химический состав.

Распространенность элементов в метеоритах

Минеральный (фазовый) состав метеоритов; классификация метеоритов; проблема среднего состава метеоритного вещества. Основные закономерности распространенности элементов в хондритах; сравнение метеоритной и солнечной кривых распространенности элементов – сходства и различия. Работы В.М. Гольдшмидта, А.П. Виноградова.

Метеориты как геохимическая система и представление о твердой фракции первичного протопланетного вещества; закономерности его состава. Идея о фракционировании элементов в протопланетном облаке и ее физико-химические основания.

Вторичные ядерные реакции в метеоритах; космическая история метеоритов; понятие о возрасте метеоритного вещества и космическом ("экспозиционном") возрасте метеоритов.

Распространенность элементов в планетном веществе

Методы оценки. основополагающая гипотеза об аналогии химического состава твердого вещества планет и состава метеоритов. Две группы планет Солнечной системы; различия в их строении и составе.

Данные о планетах земной группы; средняя плотность планет и ее интерпретация; роль металлических ядер в сложении планет. Идея о фракционировании элементов в процессе аккреции.

Распространенность элементов в земной коре

Методы оценки среднего химического состава земной коры. Работы Ф.У. Кларка, В.И. Вернадского, И. и В. Ноддаков, В.М. Гольдшмидта, А.Е. Ферсмана, А.П. Виноградова. Современные представления о структуре земной коры; типы земной коры. Масса коры и отдельных ее структурных единиц; оценка масс различных генетических групп пород в земной коре. Работы А. Полдерварта, А.Б. Ронова, А.А. Беуса, С.Р. Тейлора. Современные оценки распространенности элементов в земной коре; основные закономерности распространенности элементов в земной коре.

Представление о корах планет как геохимической системе. Принципиальное отличие состава коры Земли, Луны, Венеры, Марса от состава исходного (солнечно-метеоритного) вещества.

Представление об атмосферах и гидросферах планет как геохимических системах. Два типа атмосфер планет. Геохимические признаки "холодного" происхождения планет. Работы А.П. Виноградова.

Строение Земли и других планет земного типа, состав и происхождение ядра оболочек

Геохимические данные о строении Земли. Земная кора, мантия, ядро. Способы оценки среднего состава оболочек и ядра Земли. Полиморфизм и состояние вещества в глубинных сферах Земли.

Современные данные о химическом составе мантии Земли; проблема геохимической гетерогенности мантии.

Общие закономерности распределения элементов по оболочкам Земли, сопоставление с метеоритами. Принцип выплавления и дегазации. Классические представления В.М. Гольдшмидта и А.Е. Ферсмана о первичной дифференциации планетного вещества; гипотезы выплавления; гипотеза А.П. Виноградова об аналогии процесса выплавления и дегазации механизму зонного плавления и ее физико-химическое основание. Работы А.П. Виноградова.

Данные о строении Луны и составе пород ее коры; оценка состава пород Венеры и Марса; сопоставление с метеоритами. Всеобщность принципа выплавления и дегазации для планет земной группы. Закономерности фракционирования элементов в ходе дифференциации планетного вещества.

Энергетика планет: роль радиогенного тепла, другие виды энергии (гравитационная и др.). Термическая история планет земной группы.

Геохимическая классификация элементов

Задача классификации. Периодический закон Д.И. Менделеева и классификация элементов. Классификация В.И. Вернадского; другие классификации.

Идея классификации В.М. Гольдшмидта. Распределение элементов по принципиальным фазам метеоритного (протопланетного) вещества; термодинамические основания этого распределения. Связь с положением в таблице Д.И. Менделеева и на кривой атомных объемов. Распространенность элементов и принцип классификации.

Состояние (формы нахождения) элементов в природе

Минералы – продукты природных химических реакций. Направленность реакций; критерий минимума свободной энергии. Представление о геохимических буферных системах. Ограниченность числа минеральных видов; обменные реакции, буферные равновесия, изоморфизм как факторы, ограничивающий число минеральных видов. Дифференциация элементов в геохимических процессах и число минеральных видов.

Рассеяние элементов в природе. Термодинамические основания рассеяния; закон В.И. Вернадского. Формы рассеяния элементов.

Явление изоморфизма атомов в кристаллах и его геохимическое значение. Термодинамические основания явления изоморфизма (образования твердых фаз переменного состава). Два главных вопроса теории изоморфизма: стабильность изоморфных смесей и ее зависимость от термодинамических условий; поведение изоморфных смесей в различных фазовых равновесиях. Понятие о термодинамических функциях смещения, их связь с кристаллохимией.

Основные типы изоморфизма: изовалентный, гетеровалентный и др. Эмпирические правила изоморфизма: правило 15 %, правило «захвата» и «допуска» В.М. Гольдшмидта. Изоморфизм и ассоциации элементов в природе; изоморфные ряды В.И. Вернадского; диагональные ряды А.Е. Ферсмана. Изоморфизм как механизм рассеяния, концентрирования и разделения элементов.

Представления об ассоциациях химических элементов в природе.

Физико-химические основы геохимии (физическая геохимия)

Основы термодинамики природных систем. Основные понятия термодинамики (системы, фазы, компоненты, параметры состояния, 1-й и 2-й законы термодинамики. Условия равновесия. Правило фаз Гиббса. Термодинамические потенциалы систем. Закон дифференциальной подвижности компонентов Д.С. Коржинского. Термодинамика систем с вполне подвижными компонентами (термодинамические потенциалы, правило фаз и др.).

Уравнение смещенного равновесия и вытекающие из него законы (закон действующих масс, уравнения Клапейрона, Вант-Гоффа и др.). Способы термодинамического расчета фазовых равновесий.

Диаграммы состояния конденсированных систем. Диаграммы состояния систем с летучими и другими вполне подвижными компонентами. Буферные системы и их геохимическое значение.

Распределение химических элементов между фазами в условиях равновесия. Закон Генри и др. Понятие коэффициента распределения, зависимость от температуры и давления; представление о геотермометрах и геобарометрах.

Термодинамика водных растворов. Формы нахождения элементов в растворах, активности и концентрации компонентов. Закон Дебая-Хюккеля. Растворение, перенос компонентов, комплексообразование и причины осаждения. Кислотно-основные и окислительно-восстановительные реакции, диаграммы Eh–pH. Представления о геохимических барьерах.

Основные представления о диффузии и конвекции как механизмах массопереноса и дифференциации в геохимии. Влияние проницаемости среды и фазового состояния подвижной фазы, фильтрационный эффект. Роль кинетических факторов в реакциях минералообразования. Понятие о динамике процессов и динамических физико-химических моделях природных процессов.

Понятие о миграции элементов. Явления концентрации и рассеяния. Основные разделительные процессы в земной коре: при дифференциации расплавов, при взаимодействии фильтрующихся вод с породами. Термодинамические законы разделения элементов и изотопов в гомогенных системах: гравитационное равновесие, термодиффузия; термодинамические законы разделения элементов и изотопов в

гетерогенных системах (распределение по фазам): равновесия кристаллизации, ликвации, равновесия газ – расплав, равновесие твердая фаза – водный раствор. Свойства соединений элементов, предопределяющие их разделение: парциальные мольные энтальпии, энтропии, объемы, теплоемкости в твердых и жидких фазах, изменение этих величин при фазовых переходах; их связь с коэффициентами распределения.

Элементарные свойства атомов и ионов, определяющие свойства их соединений: геометрические – понятие об атомных и ионных радиусах, современные представления о размерах атомов и ионов; валентность и эффективный заряд атомов и ионов; свойства связи – представления о характере строения электронных оболочек и важнейших типах химической связи в соединениях: понятия поляризации и электроотрицательности; характер связи в основных группах минералов (силикатах, солях кислородных кислот, окислах, гидроокислах, галогенидах, сульфидах, металлах). Фундаментальное значение отношения заряда иона к его размеру; понятие ионного потенциала; диаграмма ионных потенциалов.

Понятие энергии кристаллической решетки и энергии атомизации кристаллов; теоретические уравнения; экспериментальные методы определения. Геохимическое значение энергии кристаллической решетки. Энергетические коэффициенты (ЭКи) А.Е. Ферсмана, принципиальная ограниченность системы ЭКов; учение о парагене. Связь кристаллохимического и термодинамического подходов в геохимии.

Изотопы химических элементов. Разница масс атомов как причина разделения изотопов легких элементов в физических и физико-химических процессах, представления о термодинамических и кинетических изотопных эффектах. Коэффициенты фракционирования, их зависимость от температуры и давления. Динамика фракционирования изотопов в закрытых и открытых системах.

Стабильные и нестабильные изотопы, явление радиоактивности, радиогенные изотопы. Типы радиоактивности. Закон радиоактивного распада, понятия константы распада и периода полураспада. Принципы изотопной геохронологии. Метод изохрон.

Геохимия геологических процессов

Геохимия магматического процесса

Химический состав и классификация магматических пород. Распространенность элементов в магматических породах; закономерности изменения распространенности в зависимости от содержания кремнезема. Ассоциации элементов ультраосновных, основных, кислых и щелочных пород. Представление о дифференцированных сериях магматических пород. Относительная распространенность различных типов магматических пород.

Физико-химические закономерности кристаллизации породообразующих силикатов и поведение элементов-примесей в этом процессе. Работы Н.Л. Боуэна и В.М. Гольдшмидта. Сопоставление закономерностей поведения элементов в процессе магматической эволюции с результатами физико-химического анализа; идея об основополагающей роли кристаллизационной дифференциации как механизма разделения элементов в магматическом процессе. Физико-химическая оценка других гипотез дифференциации магмы (ликвация, газовый перенос, гравитационная диффузия).

Представление о «первичных магмах»; условия формирования магм в земной коре и верхней мантии, состав «первичных» магм. Геохимия кристаллизационной дифференциации; элементы протокристаллизации, главного этапа кристаллизации, остаточных расплавов. Геохимия ультраосновных пород, базальтов, щелочных пород, карбонатитов; геохимические признаки их глубинного (мантийного) происхождения. Граниты; их химический и изотопный состав; проблема формирования гранитного вещества в земной коре; представления о явлениях гранитизации.

Типы магматических рудных месторождений. Процесс дифференциации магмы как процесс рудообразования; роль кристаллизационной дифференциации.

Геохимия пегматитов

Представление о пегматитах как остаточных геохимических системах. Особенности структуры и состава пегматитов в сопоставлении с составом материнских пород. Геохимия гранитных пегматитов; особенности строения, классификации, последовательность формирования. Работы А.Е. Ферсмана. Гипотезы о механизме формирования пегматитов; физико-химические особенности силикатных систем с летучими компонентами. Геохимия пегматитов щелочных и других типов пород. Типы руд, связанных с пегматитами.

Геохимия грейзенов и пневматолитов

Ассоциация элементов грейзеновых образований. Признаки высокотемпературных реакций газов с породами; роль фтора, а также хлора, бора, серы и др. Типы месторождений, связанных с грейзенами.

Состав вулканических газов; закономерности изменения состава водных источников и газов вулканических областей в ходе вулканического процесса. Газы ювенильные и возрожденные; геохимические признаки происхождения вулканических газов.

Физико-химические закономерности растворимости газов в силикатных расплавах; эволюция состава газовой фазы в зависимости от температуры и давления. Сопоставление с природными данными.

Геохимия гидротермально-метасоматических процессов

Ассоциация элементов в гидротермально-метасоматических образованиях; корреляция ассоциаций элементов с геологическими условиями формирования месторождений.

Сульфидная линия процесса. Типы гидротермальных сульфидных месторождений и соответствующие им ассоциации рудных элементов.

Контактные процессы. Типы контактных образований; скарны, фениты и др.; соответствующие им ассоциации рудных элементов.

Метасоматические и автометасоматические образования: пропилиты, вторичные кварциты, березиты, щелочные метасоматиты, гумбеиты, аргиллизиты, продукты доломитизации, серпентинизации ультраосновных пород, альбитизации гранитоидов и др.; их геохимические особенности и соответствующие им ассоциации рудных элементов.

Термодинамические условия гидротермально-метасоматических процессов. Данные о составе гидротермальных растворов, о температуре и давлении процессов. Особенности современного гидротермального рудообразования.

Три основные проблемы гидротермально-метасоматических процессов: источник вещества, способы переноса и способы отложения; и их решение на основе идеи о взаимодействии вод с магмами и горными породами. Происхождение основных компонентов гидротермальных растворов (магматогенные, метаморфогенные воды, захороненные воды осадочных пород); факты и гипотезы. Происхождение рудных компонентов гидротермальных растворов; магматогенная и осадочно-метаморфогенная гипотезы; данные по изотопному составу свинца, серы, кислорода. Состояние элементов в гидротермальных растворах; физико-химические факторы, способствующие растворению и переносу рудных элементов. Факторы отложения и концентрирования рудных элементов из растворов; фундаментальная роль взаимодействия растворов с породами как фактора рудоотложения.

Основы физико-химической динамики гидротермально-метасоматических процессов. Теория метасоматической зональности, Д.С. Коржинского. Зональность и стадийность гидротермально-метасоматических образований как отражение гидротермально-метасоматической дифференциации элементов. Факторы и механизмы гидротермально-метасоматической дифференциации; роль изменения температуры, давления; значение процессов фильтрации и взаимодействия растворов с породами, смешение растворов. Единство зонального ряда отложения металлов. Многообразие условий формирования гидротермальных растворов как фактор многообразия типов гидротермально-метасоматических месторождений.

Геохимия процессов выветривания и осадкообразования

Геохимическая (Гольдшмидтовская) классификация осадочных образований. Химический состав и ассоциации элементов различных типов осадочных пород. Относительная распространенность различных типов осадочных пород.

Физико-химические факторы осадочной дифференциации. Роль температуры, давления, состава атмосферы и вод; значение активности живых организмов и органического вещества осадков. Кислотность и окислительно-восстановительный потенциал растворов как факторы разделения и концентрированная элементов; диаграммы Eh–рН. Специфика физико-химических условий процессов выветривания и почвообразования, сноса, осадконакопления, диагенеза; связь с геолого-тектоническими и климатическими условиями; типы бассейнов осадконакопления. Особенности современных процессов осадкообразования: геохимия кор выветривания и почв континентов; особенности процессов формирования континентального стока, средний состав жидкого и твердого стока, другие механизмы поставки материала, их количественные оценки; динамика седиментации в бассейнах осадконакопления, геотектонические и фациальные закономерности отложения терригенного, биогенного и хемогенного материала; геохимия диагенеза. Работы Н.М. Страхова, А.П. Лисицына, А.Б. Ронина, Р.М. Гаррелса.

Типы осадочных рудных месторождений и месторождений кор выветривания. Осадочная дифференциация как рудообразующий процесс; динамические модели осадочной дифференциации и анализ факторов концентрирования рудных элементов в этом процессе.

Эпигенетические процессы в осадочных породах и их роль в концентрировании металлов; характерные ассоциации элементов эпигенетических руд в осадочных породах.

Эволюция процессов осадкообразования в истории Земли

Оценка общей массы осадочных пород и интенсивности поверхностных процессов в геологической истории; роль осадочно-вулканогенных пород в глубоком докембрии и специфика их химического состава.

Геохимия метаморфического процесса. Химические типы метаморфических пород, соответствующие им ассоциации элементов. Зависимость состава метаморфических пород от условий метаморфизма. Ультраметаморфизм и гранитизация.

Роль метаморфических пород в сложении земной коры. Оценка общей массы метаморфических пород; средний химический состав древних метаморфических пород и проблема его отличия от состава фанерозойских осадков.

Физико-химические факторы метаморфизма. Принцип метаморфических фаций и основная физико-химическая направленность прогрессивного метаморфозам; подвижность элементов при метаморфизме. Факторы формирования химического состава метаморфических пород: состав исходных (метаморфизирующихся) пород и химическая направленность привноса и выноса. Представление о метаморфической дифференциации.

Типы рудных месторождений, связанных с метаморфическими породами; оценка роли процессов метаморфической дифференциации в формировании собственно метаморфических месторождений.

Геохимия гидросферы

Масса и химический состав вод гидросферы; сопоставление состава морских и континентальных вод; устойчивость состава солевой массы океана; колебания солености морских вод. Малые компоненты гидросферы; жизнь и органическое вещество морских вод. Работы А.П. Виноградова.

Физико-химические факторы, определяющие состав вод гидросферы; понятие о морской и континентальной ветвях вод; идея об определяющей роли взаимодействия вод с породами земной коры и атмосферой как фактора, контролирующего химический состав гидросферы. Работы М.Г. Валяшко.

Океан как динамическая система. Соотношение процессов поступления материала в океан и осадконакопления; круговорот воды. Понятие о среднем времени пребывания элементов в океанической воде; время пребывания элементов (примеры).

Источник вещества гидросферы; геохимический баланс процесса осадкообразования и представление об «избыточно летучих»; источники летучих на поверхности Земли. Работы В.М. Гольдшмидта, В. Руби, Х. Холланда. Формирование солевой массы океана.

Проблема эволюции состава гидросферы в ходе геологической истории. Факты, свидетельствующие об эволюции; факторы, вызывающие эволюцию, и факторы, стабилизирующие состав океана. Идея постоянства состава океанических вод в течение существенной части геологической истории. Гипотезы о составе древнейшей гидросферы.

Геохимия атмосферы

Состав атмосферы; строение атмосферы и распределение ее компонентов по высоте. Факторы, контролирующие химический состав атмосферы. Атмосфера как динамическая система и геохимические циклы газов атмосферы. Инертные газы.

Происхождение и эволюция атмосферы. Источник газов на поверхности Земли; проблема потери газов Землей; геохимические признаки отсутствия на Земле древней плотной атмосферы. Вулканические газы и гипотезы о так называемой «первичной» атмосфере; факторы эволюции атмосферы.

Подземные атмосферы; их состав и классификация. Геохимические признаки происхождения газов подземных атмосфер. Работы В.В. Белоусова.

Геохимия биосферы

Определение В.И. Вернадского биосферы и живого вещества. Живое вещество; его количество и химический состав, ассоциации элементов живого вещества (биофильные элементы). Энергия и активность живого вещества. Понятие о биогеохимических процессах; прямое и косвенное влияние организмов на геологические процессы; геохимические функции организмов; организмы-концентраторы. Живое вещество как мощный геологический фактор в истории земной коры; понятие о ноосфере. Работы В.И. Вернадского.

Органическое вещество в геохимии. Распространенность и формы накопления органического вещества. Состав органического вещества осадков и осадочных пород; ассоциации элементов, накапливающихся в связи с органическим веществом; органическое вещество как фактор концентрирования элементов. Разложение органического вещества в почвах и осадках, и влияние этого процесса на физико-химические параметры геохимических процессов. Геохимия нефти и угля.

Биогеохимические провинции. Связь условий жизнедеятельности организмов с химическим составом среды; понятие эндемии. Факторы формирования биогеохимических провинций. Значение биогеохимических провинций в хозяйственной деятельности человека. Работы А.П. Виноградова, В.В. Ковальского.

Круговорот химических элементов в земной коре, геохимические циклы. Круговорот вещества в земной коре и представление о малом и большом геохимических циклах, биогеохимические циклы. Энергетика геохимических процессов; движущие силы геохимического цикла. Динамика большого геохимического цикла; оценка темпа кругооборота вещества в геологической истории. Идея о геохимическом балансе процессов преобразования вещества в ходе кругооборота. Работы Ф.У. Кларка, В.М. Гольдшмидта, Р.М. Гаррелса. Роль процессов магматизма, осадкообразования и метаморфизма в формировании современной структуры земной коры. Проблема эволюции земной коры и законы геохимического круговорота.

Геохимия отдельных элементов

Для каждого химического элемента последовательно рассматриваются следующие вопросы: состояние в природе, типы соединений; кристаллохимические особенности, изоморфные отношения; минералогия; растворимость соединений и формы переноса в водных растворах; распространенность в природе; распределение в магматических породах, связь с другими элементами, поведение в магматических процессах, поведение в процессах формирования магматических руд; поведение в гидротермально-метасоматических процессах, типы концентраций и ассоциации с другими элементами; поведение в процессах выветривания и осадкообразования, пути и механизмы концентрации в ходе формирования кор выветривания и осадкообразования; роль органического вещества; изотопы элемента и их геохимическое значение.

4. Геохимические методы поисков полезных ископаемых

Учение о геохимических поисках месторождений полезных ископаемых как самостоятельный раздел геологических наук. Роль и место геохимических методов на этапах и стадиях геологоразведочного процесса. Работы Н.И. Сафронова, А.П. Соловова, В.А. Соколова, А.И. Перельмана.

Общие принципы геохимических методов поисков

Понятия о геохимическом поле, местном геохимическом фоне, «явных» и слабых геохимических аномалиях; месторождение полезного ископаемого как частный случай геохимической аномалии. Первичный ореол месторождения. Гипергенное поле рассеяния; вторичные ореолы и потоки рассеяния полезных ископаемых в геосферах.

Параметры геохимического поля, критерии выделения слабых аномалий. Понятие о параметрических и непараметрических геохимических показателях. Случайные (стохастические) и пространственно-упорядоченные (детерминированные) распределения химических элементов в геологических образованиях. Показатель площадной продуктивности геохимической аномалии, его независимость от масштаба съемки. Пропорциональность количественных показателей гипергенных геохимических аномалий своему коренному оруденению.

Десятичная классификация месторождений полезных ископаемых по запасам, соотношение между численностью месторождений различных классов крупности. Принцип геометрического и геохимического подобия генетически однотипных объектов различных классов крупности. Зависимость между кларками элементов в литосфере и промышленными запасами в месторождениях одинаковой крупности.

Взаимосвязанность и взаимообусловленность геохимических аномалий в геосферах. Последовательность этих связей и преимущества литохимического метода поисков.

Учение Б.Б. Польнова о геохимических ландшафтах. Элементарные ландшафты. Классификация ландшафтов на основе биоклиматической зональности. Коэффициенты водной миграции и талассофильности элементов, элементы с контрастной миграционной характеристикой. Типы геохимических барьеров и их роль в образовании геохимических аномалий.

Литохимические методы поисков

Потоки рассеяния рудных месторождений. Ежегодный слой денудации; идеальный поток рассеяния в русле 1-го порядка. Продуктивность потока рассеяния; зависимость содержаний и продуктивности потока рассеяния от положения рудного объекта в бассейне водосбора; коэффициент пропорциональности. Динамика формирования потока рассеяния, влияние на состав аллювия материала ближайших склонов. «Кажущаяся» продуктивность потока рассеяния и оценка его истинной продуктивности. Оценка прогнозных ресурсов металлов категории P_3 как критерий перехода к следующей стадии работ.

Вторичные ореолы рассеяния. Стадии выветривания горных пород и профиль рыхлых образований; генетическая классификация рыхлых образований. Классификация вторичных ореолов рассеяния по фазе, генезису и признаку доступности для обнаружения. Механический ореол рассеяния; три типа подвижности частиц в зоне выветривания; вывод функции рассеяния для тонкого рудного тела, параметры остаточного ореола M и \square и их геохимический смысл. Взаимоотношения между идеальным и реальными ореолами, коэффициент остаточной продуктивности и его зависимость от местных ландшафтно-геохимических условий; методы подсчета площадной продуктивности. Оценка прогнозных ресурсов рудных объектов по категориям P_2 и P_1 . Солевой ореол рассеяния сульфидного месторождения. Наложенные геохимические ореолы рассеяния; испарительная, сорбционная и биогенная аккумуляция рудных элементов у поверхности. Методы усиления слабых геохимических аномалий.

Первичные ореолы рудных месторождений. Поиски слепых рудных тел по первичным ореолам на флангах и глубоких горизонтах разведываемых и эксплуатируемых месторождений. Ряды зонального отложения элементов типоморфного комплекса и методы их выявления. Исследование геохимической зональности рудных месторождений на ЭВМ. Генетически однотипные месторождения различной крупности как геометрические и геохимические фигуры подобия. Коэффициент подобия, методы его оценки. Соотношения между полными запасами, учет уровня эрозионного среза и доли забалансовых руд. Оценка слепых рудных тел по их надрудным первичным ореолам.

Методы анализа, применяемые при литохимических поисках.

Гидрохимические методы поисков

Гидрохимические поиски рудных месторождений по катионам металлов и по сульфат-иону путем опробования поверхностных водных потоков. Писки погребенных месторождений в закрытых районах при наличии водоносного горизонта. Методы анализа, применяемые при гидрохимических поисках.

Атмохимические (газовые) методы поисков

Образование газовых ореолов рассеяния путем эффузии и диффузии газов через горные породы. Влияние природных факторов на концентрацию газов в перекрывающих отложениях и в приземной атмосфере. Газы нефтяных и угольных месторождений, газы рудных месторождений. Типы и виды газовых съемок: гелиевая, газортутные съемки. Методика и техника отбора газов при разных видах съемки. Аэрогазовые съемки. Принципы хроматографического анализа газовых смесей.

Биогеохимический метод поисков

Собственно биогеохимический и геоботанический методы поисков. Коэффициент биогенного поглощения элементов, биогеохимические барьеры. Методика и техника биогеохимических съемок в закрытых районах; области эффективного применения биогеохимического метода поисков.

Экологическая геохимия

Учение В.И. Вернадского о биосфере. Понятие «техногенез». Технофильность химических элементов. Окружающая среда и ее компоненты.

Условия формирования, параметры и характеристики техногенных геохимических аномалий

Техногенные геохимические аномалии в горно-рудных районах. Рудные месторождения как источники загрязнения окружающей среды. Основные источники техногенных геохимических аномалий при проведении геолого-разведочных работ, формы нахождения химических элементов и техногенная геохимическая миграция. Параметры и характеристики техногенных геохимических аномалий в горнорудных районах. Количественные показатели и характеристики для оценки геохимического загрязнения. Природноохранные мероприятия.

Воздействие на окружающую среду при промышленной обработке месторождений. Типовой состав горно-обогатительного комплекса и геохимические цепи воздействия горно-рудной промышленности на окружающую среду; выбросы в атмосферу, накопление в хвостах, потери при транспортировке, промышленные стоки. Параметры и характеристики техногенных геохимических аномалий в районах горно-рудного производства и критерии оценки состояния окружающей среды.

Геохимическое загрязнение городов и урбанизированных территорий. Глобальный характер воздействия на окружающую среду урбанизированных территорий. Виды и основные источники загрязнений окружающей среды в городах, цепи распространения загрязняющих веществ; промышленные, коммунальные и бытовые отходы. Аэрогенные аномалии, выпадение твердых осадков на поверхность, жидкие стоки. Состав элементов-загрязнителей сточных вод различных видов производства. Характеристики техногенного загрязнения поверхностных и подземных вод промышленными стоками. Пути уменьшения воздействия от выбросов и очистка стоков. Геохимическая оценка нагрузки на окружающую среду в городах.

Геохимическое загрязнение сельскохозяйственных территорий. Агротехническое воздействие на сельскохозяйственные территории. Агротехническая обработка, мелиорация, геохимическое загрязнение при использовании минеральных удобрений и пестицидов. Особенности миграции элементов в агроландшафтах. Влияние урбанизированных территорий на агропромышленное производство.

Методика эколого-геохимических исследований и аналитическое обеспечение работ

Виды и масштабы эколого-геохимических съемок. Связь между источниками загрязнений, средой опробования и масштабом съемок. Наземные, воздушные, подземные, наводные, подводные, снеговые съемки. Опробование почв. Опробование поверхностных и подземных вод, режимные гидрологические, гидрогеологические и гидрохимические наблюдения. Опробование снегового покрова. Проведение пылевых смывов с растительности. Особенности эколого-геохимического изучения различных типов территорий и ландшафтов.

Геохимический мониторинг окружающей среды.

Многоцелевое геохимическое картирование. Геохимическая карта как основа прогноза загрязнения окружающей среды.

Методы анализа геохимических проб. Современные методы определения содержания химических элементов и различных их форм нахождения.

Показатели, используемые при оценке загрязнения компонентов окружающей среды

Токсичность и классы опасности химических элементов. Предельно допустимые концентрации химических элементов (ПДК); ориентировочно допустимые концентрации химических элементов и ориентировочно безопасные уровни воздействия загрязняющих веществ.

Количественные геохимические показатели, используемые при оценке компонентов окружающей среды: среднеаномальные содержания, кларк концентрации, площадь загрязнения, количество металла в загрязняющем слое.

Суммарный показатель загрязнения почв, снегового покрова, растительности, донных отложений и вод. Уровни загрязнения компонентов окружающей среды.

Понятие оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС). Цели, задачи, принципы и область применения ОВОС. Государственная экологическая экспертиза.

Основная литература

Минералогия:

1. Бетехтин А.Г. Курс минералогии – А.Г. Бетехтин. М.: КДУ. – 2014. – 736 с. [1экз.]
2. Булах А.Г., Кривовичев В.Г., Золотарев А.А. Общая минералогия. М.: Академия, 2008. – 416 с.
3. Булах, Андрей Глебович. Минералогия: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / А. Г. Булах. – М.: Издат. центр Академия, 2011. – 288 с.: ил. + [4] л. цв. ил. – (Бакалавриат). - Библиогр.: с. 267. – Предм. указ.: с. 270. - ISBN 978-5-7695-7955-4. [1экз.]

- Булах, Андрей Глебович. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб.: Изд.-во СПбГУ, 2014. – 132 с.
- Вернадский В.И. Опыт описательной минералогии. Изд-во «Юрайт». 2018 г. 498 с. Режим доступа: <https://biblio-online.ru/book/32242EED-3E36-4964-9C5E-D57B436F01C8/opyt-opisatelnoy-mineralologii>

Кристаллография:

- Бокий Г.Б. Кристаллохимия. М.: Наука. 1971. 400 с. [1 экз.]
- Егоров-Тисменко Ю. К. Кристаллография и кристаллохимия / Ю. А. Егоров-Тисменко; ред. В. С. Урусов; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, геолог. фак. – 3-е изд. – М.: ИД КДУ, 2014. – 588 с.: ил., табл. – Предм. указ.: с. 559. – Библиогр.: с. 583. – ISBN 978-5-98227-687-2 [4 экз.]
- Зоркий П.М. Задачник по кристаллохимии и кристаллографии М. Кн. дом. Университет. 1981. 40 с.
- Кривовичев СВ., Филатов С.К. Кристаллохимия минералов и неорганических соединений с комплексами анионоцентрированных тетраэдров. СПб: изд. СПбГУ, 2001. 200 с.
- Либау Ф. Структурная химия силикатов. Пер. с англ. – М.: Мир. 1988. 412 с.
- Попов Г.М., Шафрановский И.И. Кристаллография. М.: Высшая школа. 1972. 352 с.
- Попов, Георгий Михайлович. Кристаллография: учебник / Г. М. Попов, И. И. Шафрановский. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1964. – 370 с.: ил. [1 экз.]
- Современная кристаллография. Ред. Б.К. Вайнштейн. Т. 1. Симметрия кристаллов. Методы структурной кристаллографии. М.: Наука, 1979. 383 с. [1 экз.]
- Урусов В.С., Еремин Н.Н. Кристаллохимия. Краткий курс. М.: Изд-во МГУ. 2010. 256 с. [1 экз.]
- Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М.: Изд-во МГУ. 1987. 275 с.
- Филатов С.К. Высокотемпературная кристаллохимия. Л.: Недра. 1990. 288 с.
- Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф., Фадеев М.А. Кристаллография. М.: Изд-во Физико-математической литературы. 2000. 496 с.
- Krivovichev S.V. Structural mineralogy and inorganic crystal chemistry. Selected chapters. St.-Pb.: St.-Pb. Press. 2009. 398 p.
- Liebau, F. Structural Chemistry of Silicates. Structure, Bonding and Classification / F. Liebau. - Berlin : Springer, 1985. – 346 p. [1 экз.]
- Strunz H, Nickel E.H. Strunz mineralogical tables. Chemical-structural mineral classification system, 9th edition. E. Schweizerb. Verlagsb., Stuttgart. 2001. 870 p.

Геохимия:

- Антипин В.С., Макрыгина В.А. Геохимия эндогенных процессов / Иркутск: ИГУ, 2008. – 363 с.
- Воронцов А.А., Радомская Т.А., Сотникова И.А. Общая геохимия / Иркутск: ИГУ, 2016. – 207 с.
- Козлов В.Д. Введение в геохимию / Изд. 2-е испр. И доп. – Иркутск: ИГУ, 2007. – 220 с.
- Макрыгина В.А. Геохимия отдельных элементов / отв. Ред. В.С. Антипин, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, НОЦ «Байкал-геохимия». – Новосибирск: Академическое изд.-во «Гео», 2011. – 195 с.
- Яковлев Д.А., Радомская Т.А., Воронцов А.А., Фёдоров А.М., Будяк А.Е. Общая геохимия / Иркутск: ИГУ, 2019. – 301 с.
- Яковлев Д.А., Радомская Т.А., Воронцов А.А., Фёдоров А.М., Будяк А.Е. Общая геохимия / Инфра-Инженерия: 2-е издание. 2021. – 304 с.

Геохимические методы поисков:

- Соловов А. П. Геохимические методы поисков рудных месторождений: сб. задач для геол. спец. вузов / Александр Петрович Соловов, Алексей Алексеевич Матвеев, 1985. – 228 с.
- Соловов А. П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: учеб. для ун-тов по спец. "Геохимия" / Александр Петрович Соловов, 1985. – 294 с.
- Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / Под ред. А. П. Соловова, 1990. – 335 с.

Дополнительная литература

Минералогия:

- Афанасьева М.А. и др. Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических горных пород / под ред. В.С. Попова, О.А. Богатикова. М.: Логос, 2001. – 768 с.
- Барабанов В.Ф. Генетическая минералогия. Л.: Недра, 1977. – 329 с. [1 экз.]
- Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М.: Недра, 1976.
- Белоусова О.Н., Михина В.В. Общий курс петрографии. М.: Недра, 1972. – 344 с.
- Бери Л., Мейсон Б. Дитрих Р. Минералогия. М.: Мир, 1987. – 591 с.
- Буланов В.А. Сизых А.И. Диагностика минералов. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1991. – 248 с.
- Буланов В.А., Белоголов А.А., Сизых А.И. Практическая минералогия с основами кристаллографии. –

- Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1995. – 248 с.
8. Гинзбург А.И., Кузьмин В.И., Сидоренко Г.Л. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М.: Недра, 1981. – 237 с.
 9. Годовиков А.А. Минералогия. – М.: Недра, 1983. – 647 с. [1 экз.]
 10. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов. М.: Наука, 1975. – 339 с. [2 экз.]
 11. Джонс М.П. Прикладная минералогия. Количественный подход. М.: Недра, 1991. – 390 с.
 12. Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы / Пер. с англ., под ред. В.П. Петрова. В 4-х томах. М.: Мир. Том 1. – 1965. – 372 с. том 2. – 1965. – 406 с. Том 3. – 1966. – 318 с. Том 4. – 1966. – 482 с. Т.5. – 1966. – 408 с. [2 экз.]
 13. Кантор Б.З. Минералы: полка коллекционера. М.: Хоббикнига: АСТ-пресс, 1995. – 192 с.
 14. Козлова О.Г. Морфолого-генетический анализ кристаллов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 224 с.
 15. Козлова О.Г. Рост и морфология кристаллов: учеб. пособие / О. Г. Козлова; ред. Н. В. Белов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – 303 с.: ил. [1 экз.]
 16. Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезиса минералов. М.: Наука, 1973. – 228 с. [3 экз.]
 17. Костов И. Минералогия. – М.: Недра, 1971. – 548 с. [2 экз.]
 18. Кривовичев В.Г. Минералогический словарь. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2008. – 555 с. [1 экз.]
 19. Лазаренко Е.К. Курс минералогии. – М.: Высшая школа, 1971. – 607 с.
 20. Лапутина И.П. Микрозонд в минералогии. М.: 1991. – 138 с.
 21. Летувникас А.И. Стадийность гидротермального минералообразования. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1991. – 215 с.
 22. Ляхович В.В. Акцессорные минералы горных пород. М.: Недра, 1979. – 287 с.
 23. Ляхович, В. В. Акцессорные минералы. Их генезис, состав, классификация и индикаторные признаки / В. В. Ляхович; АН СССР, М-во геологии СССР, Ин-т минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов. – М.: Наука, 1968. – 276 с. [2 экз.]
 24. Марфунин А.С. Введение в физику минералов. М.: Недра, 1974.
 25. Методы минералогических исследований: Справочник / Под ред. А.И. Гинзбурга. М.: Недра, 1985. – 480 с.
 26. Миловский А.В., Кононов О.В. Минералогия. М.: Моск. ун-т, 1982. – 311 с.
 27. Минералогическая энциклопедия / Под ред. К. Фрея. – М.: Недра, 1985. – 512 с.
 28. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. – 200 с.
 29. Попов В.А., Попова В.И. Парагенезисы форм кристаллов минералов. Миасс: ИГХ УРО РАН, 1996. – 103 с.
 30. Рид С. Дж. Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2008. – 229 с.
 31. Смольянинов Н.А. Практическое руководство по минералогии. – М.: Недра, 1972. – 357 с.
 32. Станкеев Е.А. Генетическая минералогия. М.: Недра, 1986. – 272 с.
 33. Станкеев, Е. А. Генетическая минералогия: учеб. пособие для вузов / Е. А. Станкеев. – М.: Недра, 1986. – 272 с.: ил., табл. - Библиогр.: с. 266. – Указ. типоморфных минералов: с. 268. [1 экз.]
 34. Стафеев К.Г. Генетическая минералогия. М.: Недра, 1994. – 306 с.
 35. Типохимизм минералов: Справочник / Под ред. Л.В. Чернышёвой. М.: Недра, 1989. 560 с.
 36. Штрюбель Г., Циммер З. Минералогический словарь. – М.: Недра, 1987. – 494 с.
 37. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л.: Наука, 1977.
 38. Юшкин Н.П. Топоминералогия. М.: Недра, 1992. – 354 с.
 39. Юшкин, Н. П. Введение в топоминералогии Урала / Н. П. Юшкин, О. К. Иванов, В. А. Попов; АН СССР, Ильмен. гос. заповедник, Ин-т геологии Коми фил. АН СССР, Урал. отд-ние Всесоюз. минерал. о-ва. – М.: Наука, 1986. – 294 с.: ил., табл. [1 экз.]
 40. Япаскурт О.В. Литология. М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.

Кристаллография:

1. Бацанов С.С. Экспериментальные основы структурной химии (справочное пособие), М.: Изд-во стандартов, 1986, 240 с. [1 экз.]
2. Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М.: Недра . 1976, 344 с.
3. Белов Н.В. Очерки по структурной кристаллографии и федоровским группам симметрии. М.: Наука. 1986. 279 с. [1 экз.]
4. Бубнова Р.С., Филатов С.К. Высокотемпературная кристаллохимия боратов и боросиликатов. С-Пб.: Наука. 2008. 706 с.
5. Булах А.Г., Кривовичев В.Г. Золотарев А.А. Формулы минералов. Термодинамический анализ в минералогии и геохимии. Практическое руководство и справочник. С.-Пб.: Изд-во С.-ПбГУ. 1995. 260 с.
6. Верма, А., Кришна П. Полиморфизм и политипизм в кристаллах. М.: Мир. 1969. 274 с. [1 экз.]
7. Годовиков А.А. Орбитальные радиусы и свойства элементов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е. 1977.

- 155 с. [1 экз.]
8. Годовиков А.А. Периодическая система Д.И. Менделеева и силовые характеристики элементов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е. 1981. 94 с.
 9. Евзикова Н.З. Конституционное родство и генетические ряды минералов // Новые идеи в генетической минералогии, 1983, Л.: Наука, с. 12-21.
 10. Егоров-Тисменко Ю.К., Литвинская Г.П., Загальская Ю.Г. Кристаллография. М.: Изд-во МГУ, 1992.
 11. Егоров-Тисменко Ю.К., Литвинская Г.П. Теория симметрии кристаллов. М.: ГЕОС, 2000.
 12. Макаров Е.С. Изоморфизм атомов в кристаллах. М.: Атомиздат. 1973. 288 с. [1 экз.]
 13. Марфунин А.С. Введение в физику минералов. М.: Недра. 1974. 328 с.
 14. Ормонт Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников. М.: Высшая школа, 1982. 655 с.
 15. Поваренных А.С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов. Киев: Наукова думка. 1966. 547 с.
 16. Пушаровский Д.Ю. Рентгенография минералов. М. Геоинформмарк, 2000.
 17. Пушаровский Д.Ю. Структурная минералогия силикатов и их синтетических аналогов, М.: Недра, 1986, 160 с., ил.
 18. Пушаровский Д.Ю. Урусов В.С. Структурные типы минералов. М.: Изд-во МГУ 1990. 137 с.
 19. Рентгенография основных типов породообразующих минералов / Под ред. В.А.Франк-Каменецкого. Л.: Недра, 1983.
 20. Синтез минералов. В 3-х т. Александров: ВНИИСИМС, 2000.
 21. Смирнова Н.Л., Белов Н.В. Эволюция в системе структурных типов // История и методология естественных наук, 1979. с. 94–102.
 22. Современная кристаллография. Т. 3 Образование кристаллов. / А.А. Чернов, Е.И. Гиваргизов, Х.С. Багдасаров и др. М.: Наука, 1980.
 23. Солодовников С.Ф. Основные термины и понятия структурной кристаллографии и кристаллохимии. Новосибирск, 2005. 113 с.
 24. Урусов В.С. Теория изоморфной смесимости. М.: Наука, 1977. 251 с.
 25. Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В. Геохимия твердого тела. М.: ГЕОС. 1997. 500 с.
 26. Фекличев В.Г. Плотность размещения атомов в кристаллической структуре минералов // Новые данные о минералах, 1979, вып. 28. с. 145–152.
 27. Фекличев В.Г., Титова Л.С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов // Диагностика и диагностические свойства минералов, М.: Наука, 1981, 248 с.
 28. Франк-Каменецкая О.В., Рожественская И.В. Атомарные дефекты и кристаллическая структура. Сер. Кристаллохимия. Т. 33. М.: Космосинформ. 2001. 239 с.
 29. Франк-Каменецкий В.А. Природа структурных примесей и включений в минералах. Л.: изд-во Ленингр. ун-та, 1964, 239 с.
 30. Юшкин Н.П. Эволюционные представления в современной минералогии // ЗВМО, 1982, вып. 4, с. 432–442.
 31. Юшкин Н.П., Шафрановский И.И., Янулов К.П. Законы симметрии в минералогии. Л.: Наука, Ленингр. отд-е. 1987. 335 с.
 32. Юшкин, Н. П. Введение в топоминералогии Урала / Н. П. Юшкин, О. К. Иванов, В. А. Попов; АН СССР, Ильмен. гос. заповедник, Ин-т геологии Коми фил. АН СССР, Урал. отд-ние Всесоюз. минерал. о-ва. – М.: Наука, 1986. – 294 с.: ил., табл. [1 экз.]
 33. Krivovichev S.V. Structural complexity of minerals: information storage and processing in the mineral world // Mineral. Mag., 2013. V. 25. P. 275-326.

Геохимия:

1. Браунлоу А.Х. Геохимия. М., Недра, 1984. 463с.
2. Барабанов В.Ф. Геохимия. – Л., Недра, 1985, 423с.
3. Вернадский В.И. Очерки геохимии. М., Наука, 1983.
4. Войткевич Г.В., Закруткин В.В. Основы геохимии. М., Высшая школа, 1976. 367с.
5. Гаврусевич Б.А. Основы общей геохимии. – М., Недра, 1968, 328с.
6. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 1–6. М., Недра – Экология, 1994–1998.
7. Интерпретация геохимических данных. – М., Интернет Инжиниринг, 2001.
8. Маракушев А.А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. – М., Наука, 1992, 208с.
9. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. – М., Недра, 1990, 248с.
10. Перельман А.И. Геохимия. М., Высшая школа, 1989.
11. Сауков А.А. Геохимия. – М., Наука, 1975, 480с.
12. Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М., Наука, 1977.
13. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. М., Мир, 1988.
14. Тугаринов А.И. Общая геохимия (краткий курс). – М., Атомиздат, 1973, 288с.
15. Фор Г. Основы изотопной геологии. М., Мир, 1989.

16. Хефс Й. Геохимия стабильных изотопов. – М., Мир, 1983, 200с.
17. Холленд Х. Химическая эволюция океанов и атмосферы. М., Мир, 1989.

Геохимические методы поисков:

1. Барсуков В. Л. Геохимические методы поисков рудных месторождений / В. Л. Барсуков, С. В. Григорян, Л. Н. Овчинников, 1971. – 317 с.
2. Григорян С. В. Вторичные литохимические ореолы при поисках скрытого оруденения / Сергей Вагаршакович Григорян; Отв. ред. Л. Н. Овчинников, 1985. – 238 с.
3. Григорян С. В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений / Сергей Вагаршакович Григорян, 1987. – 407 с.
4. Квятковский Е. М. Литохимические методы поисков эндогенных рудных месторождений / Е. М. Квятковский, 1977. – 189 с.
5. Критерии интерпретации первичных геохимических ореолов: сб. науч. ст. / отв. ред. С. В. Григорян, 1981. – 110 с.
6. Соловов А. П. Исследование зональности рудных месторождений с помощью ЭВМ / А. П. Соловов, А. В. Гаранин, Л. С. Виль, 1973. – 70 с.

Ответственные за специальность:

к.г.-м.н. Т.А. Радомская

к.г.-м.н. Ю.И. Тарасова

Заведующий аспирантурой:

к.ф.-м.н. А.А. Шалаев
