

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Геологический факультет



УТВЕРЖДАЮ

и.о. декана
геологического факультета МГУ,
член-корреспондент РАН
Н.Н. Бреммин

« 09 » июня 2022 г.

ПРОГРАММА-МИНИМУМ

кандидатского экзамена по специальности

Шифр и название специальности: - 1.6.4. Минералогия, кристаллография.

Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Шифр и наименование области науки: **1. Естественные науки.**

1.6. Науки о Земле и окружающей среде.

Наименование отраслей науки, по которым присуждаются ученые степени:

химические науки

Москва 2022

I. Описание программы:

Настоящая программа охватывает основополагающие разделы и области знания современной кристаллографии, кристаллохимии, минералогии, онтогении, физики минералов и методов их исследования, геохимии и геохимических методов поисков полезных ископаемых, изотопной геохимии, геохимии эндогенных и экзогенных процессов.

II. Основные разделы и вопросы к экзамену:

1. МИНЕРАЛОГИЯ

1.1. Общая часть

Понятие о минерале. Основные направления в современной минералогии. Научное и практическое значение современной минералогии.

Онтогения и филогения минералов. Облик и габитус кристаллов. Твердые и газожидкие включения в минералах. Псевдоморфозы.

Типоморфизм минералов. Связь физических свойств минералов с составом, структурой и условиями образования минералов.

Природа окраски 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. Политипия. Смешанослойные структуры. Метамиктные минералы. Аморфное, стеклообразное и коллоидное состояние вещества. Расчет кристаллохимических формул минералов. Изображение многокомпонентных систем на плоскости.

Распространенность минералов в земной коре и мантии. Понятие о процессах минералообразования: магматическом; пегматитовом, пневматолитовом, гидротермальном, метаморфическом, метасоматическом, гипергенном. Подразделение минералов на породообразующие, акцессорные, рудные, редкие и вторичные.

Полевые методы диагностики минералов.

Метеориты. Основы современной классификации метеоритов, их возраст и происхождение. Досолнечные минеральные зерна. Лунные и марсианские метеориты. Современные представления о минеральном составе планет Солнечной системы, их спутников, комет и астероидов. Космическая пыль. Тектиты.

Минералогия и материаловедение. Основные проблемы и современные тенденции в развитии материаловедения и производства материалов нового поколения. Понятие пьезоэлектричества. Пьезоэлектрические свойства кварца. Понятие керамики и технологии их получения. Основные технологические свойства керамических материалов. Основные типы сырья, применяемые в производстве керамики. Применение графита и графитоподобных материалов. Понятие «ионообменный материал». Особенности кристаллических структур ионообменников. Основные технологические свойства сорбентов. Понятие термоэлектричества. Особенности материалов, обладающих термоэлектрическими свойствами. Проблемы создания материалов-термоэлектриков. Понятие сверхпроводимости. Два типа материалов-сверхпроводников. Особенности кристаллической структуры высокотемпературных сверхпроводников. Проблемы создания материалов-сверхпроводников. Основные проблемы захоронения радиоактивных отходов. Типы радиоактивных отходов. Возможные матрицы для иммобилизации радиоактивных отходов. Методы их получения.

1.2. Описание минералов

Принципы, лежащие в основах современных классификаций минералов. Кристалло-

химическая 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. Интерметаллиды. 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, скуттерудит. Двойные сульфиды: халькопирит, станнин, борнит, ковеллин. Дисульфиды и их аналоги: пирит, кобальтин, марказит, арсенопирит. Сложные сульфиды и сульфосоли: 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, якобит, франклинит, титаномагнетит), ильменит, перовскит, минералы группы танталониобатов (пирохлор, 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, магнетит, 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 вольфрамит (гюбнерит-ферберит), ферримолибдит, крокоит.

Нитраты. Общая характеристика и условия образования в природе.

Бораты. Типы анионных группировок и основы классификации боратов. Общая характеристика и условия образования в природе. Островные бораты: ашарит, людвигит, бура. Цепочечные бораты: гидроборацит, уллексит, пандермит. Каркасные бораты: борацит.

Силикаты. Структурные типы силикатов. Алюмо-, боро-, берилло-, титано- и цирконосиликаты. 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 тетра-

эдрами и добавочными анионами: кианит, андалузит, силлиманит, ставролит, топаз, титанит, хлоритоид. Островные силикаты со сдвоенными кремнекислородными тетраэдрами (диорто-силикаты) и добавочными анионами: ильваит, каламин, лампрофиллит. Островные силикаты с изолированными и сдвоенными кремнекислородными тетраэдрами, содержащими добавочные анионы: цоизит, эпидот, алланит, пьмонтит, везувиан. Кольцевые силикаты: 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. Современная классификация амфиболов. Ромбические амфиболы: антофиллит, жедрит. Моноклинные амфиболы: минералы ряда тремолит-актинолит, роговые обманки; амфиболовые асбесты. Щелочные амфиболы.

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, диксит, накрит, галлуазит, минералы группы серпентина (антигорит, 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 - отоклаз, микроклин, адуляр, санидин; плагиоклазы — альбит, олигоклаз, андезин, лабрадор, битовнит, анортит; бариевые полевые шпаты - цельзиан, гялофан), лейцит, поллукит, 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, клиноптилозит, морденит.

Общая характеристика литофильных редких элементов в геохимико-генетическом аспекте. Общие особенности поведения и механизмы накопления лития в минералообразующих системах. Особенности кристаллохимии бериллия, причины его кристаллохимической индивидуальности. Бериллиевая минерализация и ее эволюция. Основные принципы структурной химии бора, причины его кристаллохимической индивидуальности, разнообразия и своеобразия борных минералов. Типы боратных и боросиликатных анионов. Сравнительная кристаллохимия цезия в концентрированном и рассеянном состояниях, структурные особенности собственных минералов цезия. Механизмы концентрирования рубидия и отделения его от калия. Главные особенности структурной химии REE. Редкоземельная минерализация в магматических породах нормального ряда, в гранитных пегматитах, в жилах альпийского типа, в комплексах пород щелочной формации: щелочных гранитах; щелочных сиенитах и их производных; карбонатитах; фенитах; агпаитовых породах и их дифференциатах. Общие особенности кристаллохимии и минералогии циркония и гафния. Генетическая кристаллохимия силикатов с Zr. Сходство и различия в кристаллохимии и минералогии ниобия и тантала.

1.3. 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, титаномагнетита платиноидов, апатита. Понятие о карбонатитах, их минеральный состав, генезис.

Щелочной магматизм. Стратегическое минеральное сырье.

Понятие «пегматит» и общая характеристика пегматитового процесса. Развитие учения о генезисе пегматитов в работах А.Е. Ферсмана и А.Н. Заварицкого и их последователей. 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. Особенности состава.

Минералогенез агапитовых нефелиновых сиенитов и пегматитов; апатит-нефелиновых пород. Типохимизм и эволюция состава K-Na полевых шпатов, нефелина, щелочных пироксенов и амфиболов, апатита. Типохимизм минералов группы апатита, лопарита, содалита. Эвдиалит, лампрофиллит, астрофиллит-куплетскит, энigmatит, рамзаит, мוזандрит, нептунит, натролит, дельхайелит, хибинскит, келдышит, власовит, сейдозерит... Особенности кристаллических структур щелочных Ti-, Zr-, Nb-силикатов. Ультраагапитовая минерализация: виллиомит, содовые минералы, натросилит, галит, пектолит, серандит, усингит, беловит, ломоносовит, олимпит, чкаловит, джерфишерит, расвумит.

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. Развитие идей Д.С. Коржинского о метасоматозе. Гидротермальные изменения скарновых минералов. Типичные для скарнов ассоциации рудных минералов.

Минеральные ассоциации альбититов и грейзенов. Физико-химические условия образования. Геохимическая и минералогическая характеристика. Зональность грейзеновых месторождений и их связь с гидротермальными ассоциациями.

Гидротермальные минеральные ассоциации. Связь гидротермальных растворов с магматическими очагами. Источники флюидов и рудного вещества при образовании гидротермальных жил. Жилы альпийского типа. Способы переноса и отложения вещества в гидротермальных растворах. Типы минеральных ассоциаций и их связь с глубиной образования.

Гипергенные процессы минералообразования. 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.

Минеральные ассоциации кор выветривания. 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 главнейшие 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.

Минералогия гидротермальных систем морского дна и осадочных бассейнов. Минералы курильщиков.

Минералогия месторождений Арктической зоны России и перспективы их комплексного освоения.

1.4. Современные методы исследования минералов

Электронно-зондовые методы исследования минералов, EDS, WDS, физические основы метода и области применения; сканирующая электронная микроскопия; протонный микронзондовый анализ, физические основы метода и области применения; оптическая и колебательная спектроскопия, физические основы методов, область применения; рентгенофлуоресцентный анализ, возможности и области применения; термический анализ, возможности и области применения; нейтронноактивационный анализ, физические основы метода и области применения; масспектрометрия, возможности и области применения; устройство и принципы работы масс-спектрометра, области применения ионного микрозонда; масспектрометрия с индуктивно связанной плазмой ICP-MS, LA ICP-MS и другие. Использование методов изотопной геохимии в минералогии.

2. КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

2.1 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-родов. Осевая теорема Эйлера, ее обобщенное представление и частные случаи, использование при выводе групп симметрии. Различные способы представления симметрических операций – модельный, координатный, матричный. Кристаллографические группы симметрии как пример математических замкнутых групп. Основные положения теории групп. Алгоритм вывода 32 точечных групп симметрии с использованием символики Шенфлиса.

Кристаллографические координатные системы, категории, сингонии. Распределение 32-х кристаллографических классов по трем категориям и шести сингониям - шести кристаллографическим координатным системам, отражающим основные особенности кристаллов: симметрию и анизотропию. Международные обозначения точечных классов (групп) симметрии - символика Германна-Могена. Методы графического проектирования кристаллов: сферические, стереографические и гномостереографические проекции. Их использование при проектировании классов симметрии и граней кристаллов. Сетка Вульфа. Способы определения символов граней. Индексы Вейсса и Миллера. Символы ребер кристаллов, их определение.

Морфология кристаллов. Понятие “простая форма”. Вывод простых форм кристаллов в классах разных сингоний. Роль символов граней при определении названия простых форм кристаллов кубической сингонии. Простые формы икосаэдрических групп. Морфология квазикристаллов.

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

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

Одномерные и двумерные трансляционные группы симметрии (группы симметрии бордюров и обоев), их вывод.

Пространственные (федоровские) группы симметрии, их обозначения. Принципы 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. Одномерные и двумерные группы антисимметрии. Пространственные группы антисимметрии (шубниковские группы), приемы их вывода.

Группы многоцветной симметрии (группы Белова). Применение групп антисимметрии и многоцветной симметрии для решения некоторых вопросов кристаллофизики.

2.2. Основные положения теоретической кристаллохимии

Зарождение основных идей (XVI - XVII вв.). Химическая кристаллография (конец XVIII - начало XX вв.). Основные задачи кристаллохимии и ее роль в решении минералогических и геохимических проблем. Конкретные кристаллические структуры в свете микро-симметрии. Основные термины кристаллохимии.

Пространственная решетка. 14 типов ячеек Браве, пространственные группы симметрии Е. С. Федорова. Плотнейшие шаровые упаковки. Координационный полиэдр и координационное число. Структурные единицы кристалла, мотив структуры. Полиэдрическое изображение кристаллических структур (метод Полинга-Белова). Структурный тип, понятия изоструктурности, антиизоструктурности, изотипности, гомеотипности, структурный класс. Кристаллохимические формулы. Параллелоэдры Федорова, области и многогранники Дирихле-Вороного.

Свойства атомов, важные для кристаллохимии. Строение электронных оболочек, их форма и протяженность. Электронные конфигурации элементов и Периодическая система элементов Менделеева. Орбитальные радиусы атомов и ионов. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Валентное состояние и гибридизация орбиталей. Орбитальные электроотрицательности, Поляризуемость атомов и ионов. Магнитные свойства атомов и ионов. Кислотно-основные свойства атомов и ионов.

Химическая связь в кристаллах. Основные типы химической связи: ионная, ковалентная, металлическая, вандерваальсова, водородная. Потенциальная кривая химической связи. Ионная модель, энергия решетки. Энергия сцепления кристаллов. Энергия ионной решетки. Постоянная Маделунга. Уравнения Борна. Термохимический цикл Борна-Габера. Понятие об энергии атомизации как универсальной характеристике энергии сцепления атомов в кристаллах.

Структуры типичных ионных кристаллов. Основы теории кристаллического поля. Электронная структура переходных элементов. Расщепление энергии d- и f-уровней в кристаллическом поле различной симметрии. Понятие об энергии предпочтения координации. Ковалентная связь и типичные ковалентные структуры. Связи, промежуточные между ионными и ковалентными. Степень ионности связи и ее структурное влияние. Зонная энергетическая структура кристалла: диэлектрики, полупроводники, и металлы.

Металлическая связь и ее структурные свойства. Переход от металлической к ковалентной связи и «переходные» структуры. Остаточная (Ван-дер-ваальсова) связь. Диполь-дипольные и ион-дипольные взаимодействия. Слоистые структуры. Водородная связь. Общий взгляд на природу химической связи в кристаллах.

Размеры и форма атомов в кристаллах. Атомные (металлические и ковалентные) радиусы. Ван-дер-ваальсовы (межмолекулярные) радиусы. Ионные радиусы. Геометрические пределы устойчивости ионных структур. Зависимость ионных радиусов от заряда, координационного числа и спинового состояния. Распределение электронной плотности и «кристаллические» радиусы атомов. Понятие об эффективных зарядах атомов в кристаллах и методах их определения. Поляризуемость ионов в кристалле.

Химический состав и структура кристалла. Основные категории теоретической кристаллохимии и соотношения между ними. Критерии устойчивости структурного типа для ионных кристаллов. Правила Полинга для ионных кристаллов. Фактор толерантности и модельные структуры Гольдшмидта. Критерии устойчивости структурного типа для существенно ковалентных кристаллов. Правило октета. Правило Юм-Розери. Правила Партэ. Числовые законы строения сульфидов и сульфосолей Н.В. Белова. Обобщение понятия морфотропии на примере кристаллохимии силикатов. Основной закон кристаллохимии Гольдшмидта.

Понятие о гомологических рядах. Структуры вычитания и внедрения. Псевдосимметрия. Производные и вырожденные структуры. Структурная гомология силикатов, структурная гомология халькогенидов. Гомологические серии некоторых оксидов и фторидов. Морфотропные ряды интерметаллидов.

Полисоматизм. Концепция полисоматизма и полисоматических серий. Описание модулярных (фрагментарных) кристаллических структур. 0-мерные серии структур на примере ряда пироксенов - муратаит.

Полиморфизм как общее свойство кристаллических веществ. История открытия полиморфизма как явления. Систематика полиморфных переходов. Структурные аспекты явления полиморфизма. Полиморфные переходы первого и второго рода. Изменение симметрии при изменении температуры и давления Координационные правила полиморфизма. Термодинамические основы теории полиморфизма.

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

Изоморфизм и изоструктурность. Изодиморфизм. Классификация изоморфизма, его соотношение с твердыми растворами. Эмпирические правила изоморфизма и их современная трактовка. Физико-химические основы изоморфизма. Распад изоморфных смесей при понижении температуры и повышении давления. Изоморфизм в процессах кристаллизации. Кристаллохимическая трактовка правил изоморфизма. Изоморфизм как причина ограничения числа минеральных видов.

Порядок-беспорядок в кристаллических структурах. Понятие о ближнем и дальнем порядках. Процессы внутрикристаллического упорядочения как геотермометры и геобарометры.

Кристаллохимическая систематика комплексов анионоцентрированных тетраэдров. Кристаллические структуры соединений с комплексами анионоцентрированных тетраэдров. Симметричные и геометрические ограничения существования кристаллической структуры. Конструирование пробных кристаллических структур заданного состава. Принципы полного и локального валентного и координационного баланса. Современный метод валентности связи (MBC).

Возможные методы уточнения пробной структуры кристалла. Компьютерное моделирование с использованием атомистических потенциалов межатомного взаимодействия. Квантовохимические расчеты (ab-initio).

Основная проблема кристаллохимии – выявление закономерностей состав-структура-свойства кристаллических материалов. Основные задачи и основные области кристаллохимических исследований в XXI веке. Совершенствование теории рентгеноструктурных исследований. Последние достижения в эволюции приборов для монокристалльных и порошковых дифракционных исследований. Применение синхротронного излучения, его основные свойства. Источники синхротронного излучения.

Вклад ученых кафедры кристаллографии и кристаллохимии МГУ им. М.В. Ломоносова в развитие кристаллографии. Минералы, открытые сотрудниками кафедры и/или названные в их честь. Нобелевские премии в области кристаллографии и их лауреаты, примеры.

2.3. Рост и морфология кристаллов

Кристаллообразование в гомогенных средах. Фазовые равновесия и переходы. Кри-

сталлизация как фазовый переход. Диаграммы состояния систем. Однокомпонентные и двухкомпонентные системы. Анализ диаграмм плавкости. 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.

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. Особенности послыного роста кристаллов из расплава, раствора и пара. Механизмы роста эпитаксиальных слоев.

Тепло- и массоперенос при кристаллизации. Диффузионные и поверхностные процессы. Кинетический и диффузионный режим кристаллизации. Современные принципы моделирования тепло- и массообмена в подвижных и неподвижных средах. Кристаллизация в условиях микрогравитации. Моделирование роста монокристаллов и эпитаксиальных структур.

Внешняя форма и однородность реальных кристаллов. Кристаллохимически обусловленная форма кристалла. Метод ПЦС Хартмана. Типы граней кристаллов. Современная трактовка равновесной формы: соотношение Гиббса-Томсона-Херринга. Метод средних работ отрыва Странского и Каишева. Формы роста. Корреляция между теоретически возможными, равновесными формами и формами роста кристаллов.

Эффект грани. Условия перехода от многогранника к дендриту. 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.

Генезис монокристаллических минералов. Теоретические и эмпирические подходы к изучению генезиса минералов. Общие представления о моделировании природных поликомпонентных систем. Пространственно-временные факторы. Магматический процесс. Особенности формирования силикатов и родственных им минералов. Физико-химическая и кристаллохимическая трактовка кислотно-основных свойств стеклообразующих расплавов. Первичная магматическая кристаллизация. Рост кристаллов в пегматитах. Пневматолитовые и гидротермальные образования. Метасоматоз. Роль метаморфизма. Кристаллизация в условиях осадконакопления.

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

Выращивание кристаллов из расплава. Изменение температуры при охлаждении кристаллодержателя (метод Киропулоса). Перемещение кристалла относительно расплава в температурном градиенте (метод Чохральского). Основные варианты технического исполнения метода. Получение профилированных монокристаллов (метод Степанова). Метод Бриджмена-Стокбаргера. Перемещение контейнера через зону плавления. Зонная плавка и перекристаллизация. Вертикальный и горизонтальный, тигельный и бестигельный способы. Метод Вернейля. Автоматизация процесса выращивания кристаллов из расплава.

Выращивание кристаллов из растворов. Типы растворителей. Фазовые диаграммы и кривые растворимости. Разновидности методов. Раствор-расплавная кристаллизация, ее возможности и разновидности. Расплавы-растворители. Разбавленные и высококонцентриро-

ванные системы. Основные модификации, технические приемы и перспективы развития. 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.

Гидротермальный синтез. Свойства гидротермальных растворов. Выращивание кристаллов при температурном градиенте. Метод общего охлаждения. Снижение температуры с сохранением постоянного ее перепада. Методы разделенной шихты и разделенных исходных компонентов. Вариант качающегося реактора. Кристаллизация при обычном давлении и умеренной температуре (до 100 °C).

Выращивание кристаллов из газовой (паровой) среды. Физическая конденсация. Химические транспортные реакции. Представление о ПЖК-механизме кристаллизации. Особенности получения объемных, нитевидных кристаллов, и эпитаксиальных пленок. Типичные дефекты роста кристаллов и пути их устранения. Сравнительная характеристика методов выращивания кристаллов.

Практика выращивания технических монокристаллов. Классификация выращиваемых кристаллов: химическая, кристаллохимическая, генетическая, функциональная.

Выращивание монокристаллов корунда и его разновидностей, сравнительная характеристика методов выращивания, современные области их применения. Гранат – происхождение, применение, синтетические «гранаты». Эвлитин, циркон, берилл - история, технология получения, свойства. Александрит, шпинель, фианит - история, технология получения, свойства.

Бораты — физико-химические свойства боратных систем. Орто- и оксиортобораты. Метабораты бария, полибораты - триборат цезия, цезий-литиевый триборат. Кристаллы полупроводников – германий, кремний. Виды кристаллического кремния, его получение и применение. Кристаллы KDP и KTP – свойства, технология выращивания. Сравнительная характеристика методов выращивания нелинейно-оптических кристаллов KTP и KDP. Сравнительная характеристика методических подходов при выращивании кристаллов александрита и калий-титанил-фосфата (KTP).

Оптический кальцит: генезис и морфология кристаллов исландского шпата, основные методы выращивания, кинетика кристаллизации на затравках разной ориентации, структура и свойства. Особенности выращивания кристаллов структурных аналогов берлинита. Цинкит: генезис и морфология кристаллов, основные методы выращивания, структура и свойства. Синтез кристаллов алмаза. Имитации алмаза.

Особенности образования зарождения и роста кристаллов в различных геологических средах. Анализ геологических условий на основании морфологии кристаллов. 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.

Современные методы синтеза материалов, обладающих технологически важными свойствами, примеры.

2.4. Рентгенография минералов и рентгеноструктурный анализ

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.

Когерентное и некогерентное рассеяние. Изменение длины волны при неупругом рассеянии рентгеновских лучей. Рассеяние электроном поляризованного излучения. Рассеяние

электроном неполяризованного излучения. Поляризационный фактор. Рассеяние рентгеновских лучей атомом. Атомный фактор рассеяния. Рассеяние рентгеновских лучей кристаллом. Структурная амплитуда. Фаза волны, рассеянной элементарной ячейкой. Понятие обратной решетки. Вывод квадратичных формул. Модель дифракции с использованием представлений о сфере Эвальда. Фактор Лоренца. Фактор повторяемости. Рассеяние рентгеновских лучей системой атомов. Закономерные погасания рефлексов. Вывод правил погасаний для разных типов ячеек и элементов симметрии. Определение пространственных групп.

Влияние температуры на интенсивность брэгговских отражений. Сопоставление теоретического и экспериментального рентгендифракционного спектра (на примере флюорита). Программа "LAZY PULVERIX PC" для расчета теоретического рентгендифракционного спектра.

Применение рентгенографии для исследования микронапряжений в кристаллах и определения размеров частиц в образце. Интегральная ширина пика, поправка на междубрэгговское расщепление.

Методы рентгеновской съемки кристаллов при высоких температурах и давлениях. Высокотемпературная камера Гинье: оптическая схема, расчет спектра. Порошковая камера сверхвысоких давлений. Проблемы кристаллохимии и рентгенографии высоких давлений и температур.

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.

Ошибки метода и способы получения точных значений параметров элементарной ячейки. Рекомендации по выбору максимумов для определения линейных и угловых параметров ячейки различной симметрии. Контроль надежности индирования порошкограмм по Де-Вольфу.

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.).

Определение длины волны рентгеновских лучей. Первые структурные расшифровки галита, квасцов и др.

Дифракционная картина при съемке в камере Дебая-Шеррера и расчет рентгендифракционного спектра. Влияние размера частиц на дифракционную картину в камере Дебая-Шеррера. Получение рентгендифракционного спектра в камере Гондольфи.

Современные рентгеновские аппараты и дифрактометры. Счетно-регистрирующее устройство в дифрактометре ДРОН-УМ1. Выбор режима съемки. Ограничивающие и приемные щели рентгеновского гониометра. Управляющий комплекс дифрактометра ДРОН-УМ-1. Получение рентген-дифракционных спектров (программы "dron", "mid.exe", "spectr") и определение параметров элементарной ячейки в дифрактометре ДРОН-УМ-1.

Основные принципы работы автоматического порошкового дифрактометра STOE STADI-MP с позиционно-чувствительным детектором.

Диагностика мономинеральных фаз и качественный рентгенофазовый анализ смесей химических соединений и минералов. Определители фаз. Базы данных. Индирование рентгеновских спектров (программы "ind" и "krist"). Рассеяние рентгеновских лучей атомом и системой атомов.

Количественный фазовый анализ. Факторы, влияющие на соотношение интенсивностей рефлексов в полифазном образце. Определение соотношения фаз в двухкомпонентной смеси. Методы коэффициентов и внутреннего стандарта в количественном анализе.

Современные методы рентгеновских исследований структурных превращений минералов при высоких давлениях и температурах. Знакомство с рентгеновской камерой высокого давления. Принципы кристаллохимии высоких давлений.

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, политипии, модуляции и др.

Структурные типы простых веществ и самородных металлов. Наиболее распространенные структурные типы металлов. Плотнейшие упаковки в структурах металлов. Природные интерметаллиды. Правила валентно-электронной концентрации. Структуры неметаллов и полуметаллов IV-VII групп.

Основные структурные типы галогенидов. Оксиды, гидроксиды и их структурное подобие с галогенидами. Кристаллохимия минералов железо-марганцовых конкреций. Структурные типы, устойчивые в глубинных оболочках Земли. Основные компоненты SYNROC для поглощения радиоактивных отходов.

Кристаллохимическая классификация сульфидов. Сульфиды с тетраэдрическими структурами. Структуры дисульфидов. Кластерные структуры сульфидов. Сульфиды несплошнотетраэдрических элементов.

Сульфосоли с тетраэдрическими структурами и с сульфосолевыми нитями.

Структурные принципы силикатов. Главная концепция кристаллохимии силикатов. Основные подразделения структурной систематики силикатов. Рентгенографическая диагностика слоистых силикатов. Особенности рентгено-фазового анализа минералов групп каолинита, слюды, хлорита и монтмориллонита. Рентгенографическая диагностика состава щелочных полевых шпатов и плагиоклазов.

Структурное состояние полевых шпатов и рентгеновские методы его определения. Силикаты глубинных геосфер.

Генетическая кристаллохимия фосфатов. Сравнительная кристаллохимия силикатов и фосфатов.

Кристаллохимическая систематика карбонатов и сульфатов. Смешанные комплексы в их структурах.

Кристаллохимия боратов. Структуры с анионными комплексами из В-треугольников, В-тетраэдров и обоими типами BO_n -полиэдров.

Новые полиморфные модификации порообразующих минералов: оливин, волластонит, пироксены, оксид титана и другие.

Водосодержащие минералы мантии Земли

Минералогия ядра Земли

Основные этапы структурных исследований. Получение предварительных экспериментальных данных для структурных определений. Монокристаллическая дифрактометрия. Геометрия 4-х кругового дифрактометра. Вектор дифракции и плоскость дифракции. Трансляции и их взаимная ориентация в дифрактометре "Синтекс". Особенности современных монокристаллических дифрактометров (на примере дифрактометра XCalibur S, оснащенного позиционно-чувствительным детектором).

Программы сбора экспериментальных данных. Стандартные отклонения при оценке интенсивностей дифрагированных лучей. Обработка экспериментальных данных, полученных в дифрактометре. Усреднение рефлексов. Особенности усреднения рефлексов в случае аномального рассеяния одним из атомов.

Перестановка осей и пересчет дифракционных индексов в случае неправильно выбранных параметров элементарной ячейки. Матрицы перехода от пр.гр. Pn к Pc , от I к C -ячейке у моноклинных кристаллов и от R к H -ячейке у гексагональных кристаллов. Матрица Ниггли и расчёт объёма элементарной ячейки. Пересчёт координат атомов в "новой" ячейке.

Уточнение пространственной группы. Формулы для расчёта структурных факторов в случае различных погасаний, связанных с: а) C -трансляцией; б) I -трансляцией; в) плоскостями скользящего отражения; г) винтовыми осями. Осложнения в определении пространствен-

ных групп, связанные с вторичными рефлексами. Применение теории вероятности для оценки распределения величин нормализованных структурных амплитуд в случае centrosymmetric и acentric кристаллов. Статистика интенсивностей дифракционных рефлексов и её использование для уточнения пространственной группы. Формулы Вилсона. Пример уточнения пространственной группы на основе графиков Хоуэлса, Филипса и Роджерса. Тест на энантиоморфизм и полярность структуры Г.Флака. Тест на выявление псевдосимметрии. Программа “MISSYM”.

Метод “тяжелого атома”. Ряды Фурье и идея Брэгга об их применении для описания периодической структуры кристаллов. Первые работы по проверке этой идеи: 1) определение структуры квасцов и метод изоморфных замещений; 2) сопоставление теоретического и экспериментального распределения электронной плотности в структуре диопсида; 3) определение структуры $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Функция Патерсона - формализованный метод выявления позиций тяжелых атомов. Ограничения в использовании функции Патерсона. Симметрия функции Патерсона. Пики “связки” и “взаимодействия”. Систематический анализ функции Патерсона. Теорема Бутузова-Белова. Метод “ромбов” при расшифровке функции Патерсона. Представления о суперпозиционных методах. Функция минимализации. Критерии оценки целесообразности использования метода “тяжелого атома”. Обострение функции Патерсона. Харкеровские сечения на плоскость и линию. Пример расшифровки функции Патерсона в случае структуры $\text{Nd}[\text{TaO}_3]_3$. Выявление позиции тяжелого атома на основе эффекта аномального рассеяния.

Трансформанта Фурье и её использование для расчёта электронной плотности. Формулы для расчета электронной плотности в случае centrosymmetric кристаллов и кристаллов с пр. гр. $P2_1$. Проекция электронной плотности на плоскость и линию. Осложнения, связанные с обрывом ряда.

Представления о прямых методах структурной расшифровки. История возникновения прямых методов структурной расшифровки. Единичные структурные амплитуды. Иллюстрация применения прямых методов при определении структуры алмаза. Зависимость знаков структурных амплитуд от выбора начала координат в элементарной ячейке. Правила выбора рефлексов для фиксации начала координат. Детерминант Карле-Хауптмана и получение на его основе неравенств Харкера-Каспера. Структурный инвариант. Равенство Сейра. Подход к оценке вероятности выполнения неравенства $F_{h1}F_{h2}F_{h1-h2} > 0$.

Уточнение структуры. Коэффициент приведения к абсолютной шкале. Температурный фактор (общий изотропный и анизотропный для каждого атома). Вывод формулы для расчета коэффициента Дебая-Валлера. Поправки на аномальное рассеяние, поглощение и экстинкцию. Расчет коэффициента поглощения. Ψ -сканирование. Особенности уточнения позиционных параметров и анизотропных тепловых поправок высокосимметричных кристаллов. Уточнение фактора заселенности.

Вспомогательные программы для расчета межатомных расстояний и углов; программы изображения кристаллических структур.

Расчет баланса валентностей, как критерия достоверности структурной расшифровки. Корреляция структурных особенностей и физических свойств кристаллов. Изучение усложняющих реальную структуру явлений.

Особенности уточнения модулированных структур. Описание дифракционной картины на основе 4-х и более векторов. Вектор модуляции. Волны модуляции. Использование представлений о структурной модуляции для интерпретации фазового перехода гётит-гематит. Подходы к структурной интерпретации микродвойникования и полисоматизма.

Новые возможности рентгеноструктурного анализа минералов. Использование синхротронного излучения. Дифракция при высоких давлениях. Состав верхней мантии. Состав мантии ниже границы 670 км.

Применение метода Ритвельда в рентгеноструктурном анализе.

2.5. Компьютерная кристаллография

Основные способы описания и изображения внешней формы кристалла. Реализация принципа Кюри-Вульфа при построении комбинационного многогранника. Рисование монокристаллов и двойников. Икосаэдрические объекты. Особенности программ Shape, Kristall2000. Их отличия. Способы представления: для вывода на печать с белым фоном, для создания графических файлов, для создания 3D форм и 3D-прототипирования.

Основные способы описания и изображения кристаллических структур минералов, кластеров и поверхности кристалла. Особенности программ Atoms, Vesta, Diamond - . самых известных и популярная программа визуализации кристаллических и молекулярных структур. Их отличия. Ввод химических, кристаллографических и библиографических данных. Интерактивное измерение углов и межатомных расстояний. Анимированный режим работы с программами. Построение координационных полиэдров. Инструменты для анализа кристаллической структуры и подготовки материалов. Способы представления: для вывода на печать с белым фоном, для создания графических файлов. Взаимодействие программ визуализаторов и кристаллографических баз данных. Форматы обмена данными между приложениями.

Основные базы данных - ICSD (Findit), American Mineralogist Crystal structure database, Минкрист. Особенности работы в них.

Программные комплексы 3D сред создания творческой мастерской. Особенности комплекса Material Studio - среды программного обеспечения для конструирования и моделирования материалов. Программы, входящие в базовый и расширенный пакет.

Программный продукт AVS/Express (STM4) - универсальный инструмент для визуализации данных. Создание рабочей среды для решения кристаллографических задач. Иерархия современных методов кристаллохимического прогноза. Возможные методы уточнения пробной структуры кристалла. Компьютерное моделирование структур и свойств кристаллов. Программы DLS, BondVal, GULP, Metadise, QE- особенности и границы применимости. Эволюционные подходы в структурном моделировании. Программный комплекс USPEX.

3. ГЕОХИМИЯ

Распространенность элементов в Солнечной системе.

Представление о нуклеосинтезе. Происхождение химических элементов.

Образование Солнечной системы. Распределение элементов в метеоритах.

Представление о внутреннем строении Земли, химическом составе мантии и ядра.

Гипотезы образования земной коры, гидросферы и атмосферы.

Связь геохимической классификации элементов В.М. Гольдшмидта с периодическим законом Д.И. Менделеева.

Представление об изоморфизме. Эмпирические правила изоморфизма.

Значение изоморфизма для геохимии и минералогии.

Стабильные изотопы легких элементов, их применение в геохимии.

Использование долгоживущих радиоактивных изотопов для геохронологии.

Возраст Земли. Методы определения возраста горных пород.

Фракционирование стабильных изотопов легких элементов в природе.

Поведение редких, рассеянных и рудных элементов в магматическом процессе.

Основные типы месторождений магматического генезиса.

Основные типы месторождений гидротермального происхождения.

Представление о гидротермальном процессе. Реконструкция физико-химических условий.

Понятие о геохимическом барьере.

Гидросфера Земли, закономерности состава гидросферы.

Атмосфера Земли. Происхождение основных компонентов атмосферы.

Основные химические реакции выветривания. Сопоставление состава осадочных и магматических пород.

Геохимический цикл элементов. Время пребывания. Стационарные состояния.

Великая кислородная революция. Эволюция состава атмосферы.
 Представление о биосфере В.И.Вернадского. Виды вещества биосферы.
 Биогеохимические функции живого вещества.
 Геохимический фон, «явные» и «слабые» геохимические аномалии
 Геохимическая ассоциация и типоморфная геохимическая ассоциация
 Основные параметры литохимических потоков рассеяния
 Вторичный ореол рассеяния. Принципы классификации вторичных ореолов
 Коэффициент остаточной продуктивности и как он зависит от ландшафтно-геохимических условий
 Зональность рудных месторождений. Геохимический показатель зональности.

III. Критерии оценивания

Критерии и показатели оценивания ответа на экзамене			
1	2	3	4
Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Фрагментарные знания актуальных проблем и тенденций в развитии минералогии, кристаллографии, геохимии и геохимических методов поисков полезных ископаемых	Неполные знания актуальных проблем и тенденций в развитии минералогии, кристаллографии, геохимии и геохимических методов поисков полезных ископаемых	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания актуальных проблем и тенденций в развитии минералогии, кристаллографии, геохимии и геохимических методов поисков полезных ископаемых	Сформированные и систематические знания актуальных проблем и тенденций в развитии минералогии, кристаллографии, геохимии и геохимических методов поисков полезных ископаемых

IV. Рекомендуемая основная литература:

1. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. М.КДУ. 2007.
2. Булах А.Г., Кривовичев В.Г., Золотарев А.А. Общая минералогия, СПб, 2008.
3. Власов Е.А., Кошуг Д.Г., Посухова Т.В. Методы исследования минералов. Растровая и просвечивающая электронная микроскопия и электронно-зондовый микроанализ. Учебное пособие, М., 2009, 99 с.
4. Гаранин В.К., Криулина Г.Ю., Гаранин К.В., Самосоров Г.Г. Архангельские алмазы. Новые данные. 2018. М.: Скорыходов, ISBN 978-5-6040412-0-8, 232 с.
5. Годовиков А.А. Минералогия. М., Недра, Изд.: Мин. Музей. 1998. 162 с.
6. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов. М.: Наук. 1975.
7. Кононов О.В., Устинов И.Д. Тырныауз. Технологическая минералогия. М.: Либри. 2018. 326 с.
8. Кошуг Д.Г., Кротова О.Д. Физика минералов. 2017. ИНФРА-М Москва, ISBN 978-5-16-012173-4. 348 с.
9. Кривовичев В.Г. Минералогический словарь. Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2008. 556 с. ISBN: 978-5-288-04863-0.
10. Марфунин А.С. Введение в физику минералов. М., Недра, 1974.

11. Миловский А.В., Кононов О.В. Минералогия. М., МГУ, 1982.
12. Минералы. Справочник. Т.1 – Т. V. 1960 – 2003.
13. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб. Наука. 2005. 581с.
14. Пеков И.В., Подлесный А.С. Минералогия Кукисвумчоррского месторождения (щелочные пегматиты и гидротермалиты). М., ТО «Земля», 2004, 172 с.
15. Пеков И.В., Турчкова А.Г., Ловская Е.В., Чуканов Н.В. Цеолиты щелочных массивов. М., Экост, 2004, 168 с.
16. Станкеев Е.А. Генетическая минералогия. М., Недра, 1986.
17. Marfunin A.S. Advanced mineralogy: Vol. 1. Methods and instrumentations. Berlin, Springer, 1994: XXVII, 551 p.
18. Marfunin A.S. Advanced mineralogy Vol. 2. Composition, structure and properties of mineral matter. 1995. XXI, 441 p.
19. Fleischer's Glossary of Mineral Species 2018. 12th edition. 424 p.
20. Егоров-Тисменко Ю.К. «Кристаллография и кристаллохимия», М, изд-во Книжный дом «Университет», 2005, с.520.
21. Егоров-Тисменко Ю.К. «Руководство к практическим занятиям по кристаллографии», М, Изд-во МГУ, 2010, 208 стр.
22. Егоров-Тисменко Ю.К., Литвинская Г.П., Загальская Ю.Г. «Кристаллография», М., изд-во МГУ, 1992, 288 стр.
23. Урусов В.С., Еремин Н.Н. «Кристаллохимия. Краткий курс» М., Изд-во МГУ, 2010, 258 стр.
24. Загальская Ю.Г., Литвинская Г.П., Егоров-Тисменко Ю. К. Геометрическая кристаллография, 2-е изд., М., изд-во МГУ, 1986, 166 стр.
25. Загальская Ю.Г., Литвинская Г.П., Егоров-Тисменко Ю.К. Руководство к практическим занятиям по кристаллохимии, М. изд-во МГУ, 1983, 167 стр.
26. Егоров-Тисменко Ю.К., Литвинская Г.П. Теория симметрии кристаллов. М. изд-во ГЕОС, 2000, 394 стр.
27. Еремин Н.Н., Еремина Т.А.. Неорганическая кристаллохимия. Книга 1. М.: КДУ, 394 с., ISBN 978-5-91304-763-2, 2018.
28. Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М., МГУ, 1987.
29. Урусов В.С., Еремин Н.Н. «Кристаллохимия. Краткий курс» М., Изд-во МГУ, 2010, 258 стр.
30. Бокий Г.Б. Кристаллохимия. М., Наука, 1973.
31. Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М., Недра, 1976.
32. Еремин Н.Н., Еремина Т.А., Марченко Е.И. Отдельные главы структурной химии - электронная версия М.: КДУ, 2018 ISBN 978-5-7913-1078-1, 268 с
33. Н.И. Леонюк, В.В. Мальцев. Монокристаллы тугоплавких боратов. М.: «ГЕОС», 2017, 446с.
34. Н.И. Леонюк, Е.В. Копорулина, Е.А. Волкова, В.В. Мальцев. Кристаллография: зарождение, рост и морфология кристаллов. 2017, М: «ЮРАЙТ», 154с.
35. Н.И. Леонюк, Е.В. Копорулина, Е.А. Волкова, В.В. Мальцев. Рост кристаллов. Лабораторный практикум с основами теории. М.: «ГЕОС», 2014, 142с.
36. Н.И. Леонюк, В.В. Мальцев. Кристаллогенезис в многокомпонентных расплавах. М.: «ГЕОС», 2014, 391с.
37. Н.И. Леонюк, Е.В. Копорулина, Е.А. Волкова, В.В. Мальцев. Зарождение, рост и морфология кристаллов. М: «МАКС Прес», 2010, 143с.
38. Н.И. Леонюк, В.И. Лютин, В.В. Мальцев. Выращивание монокристаллов и моделирование процессов минералообразования. М: Изд. МГУ, 2005, 103с.
39. Синтез минералов. В 3-х томах. Александров, ВНИИСИМС, 2000.
40. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. С.-Петербург: Изд. «Невский курьер», 1997, 228 с.

41. Современная кристаллография. Т.3. Образование кристаллов. М.: Изд. «Наука», 1980, 430с.
42. Пушаровский Д.Ю. Рентгенография минералов. М.-«Геоинформмарк», 2000, 292 с.
43. Пушаровский Д.Ю. Структура и свойства кристаллов. – М.: ГЕОС, 2022. – 260 с
44. Пушаровский Д. Ю. «Минералогическая кристаллография». Москва. Издательство ГЕОС. 2020. 341 с.
45. Crystal structure analysis. Principles and practice. 2-nd edition. ed. W. Clegg. Oxford Univ. press, 2009, 387 p.
46. Jenny Pickworth Glusker, Kenneth N. Trueblood. Crystal structure analysis. A Primer. 3-rd edition, 2010, 276 p.
47. “Руководство по рентгеновскому исследованию минералов”, под ред. В.А.Франк-Каменецкого. Л., “Недра”, 1976.
48. Ковба Л.М., Трунов В.К. “Рентгенофазовый анализ”, М., МГУ, 1976.
49. Липсон Г., Стипл Г. “Интерпретация порошковых рентгенограмм”, М., Мир, 1972.
50. Васильев Е.К., Нахмансон М.С. “Качественный рентгенофазовый анализ”, Новосибирск, “Наука”, СО РАН, 1986.
51. Пушаровский Д.Ю., Урусов В.С. “Структурные типы минералов”, М., МГУ, 1990.
52. “Рентгенография основных типов породообразующих минералов”, под ред. В.А.Франк-Каменецкого. Л., “Недра”, 1983.
53. Крутова Г.И., Казаков В.И. “Методические указания по исследованию глинистых минералов методом дифрактометрии”, М., УДН, 1984.
54. Урусов В.С. Еремин Н.Н. Атомистическое моделирование кристаллических структур минералов их дефектов и твердых растворов. М, ГЕОС, 2011.
55. Oganov A.R., Ed. Modern Methods of Crystal Structure Prediction. WILEY-VCH, 2011, 274 p.
56. Урусов В.С., Еремин Н.Н. «Кристаллохимия. Краткий курс» М., Изд-во МГУ, 2010, 258 стр.
57. Лорд Э.Э., Маккей А.Л., Ранганатан С. «Новая геометрия для новых материалов». М, Физматлит, 2010, 264 стр.
58. Егоров-Тисменко Ю.К. «Кристаллография и кристаллохимия», М, изд-во Книжный дом «Университет», 2005, с.520
59. 7. Еремин Н.Н., Еремина Т.А., Марченко Е.И. Отдельные главы структурной химии - электронная версия М., КДУ, 2018 ISBN 978-5-7913-1078-1, 268 с.
60. 8. Урусов В.С., Дубровинский Л.С. Конструирование вероятных кристаллических структур минералов. МГУ, 1990 г.
61. Перельман А.И. Геохимия. 3-е изд. М., ЛЕНАНД, 2016, 531 с.
62. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М., Логос, 2000, 627 с.
63. Борисов М.В., Шваров Ю.В. Термодинамика геохимических процессов. М., Изд-во Московского ун-та, 1992, 256 с.
64. Браунлоу А.Х. Геохимия, М., Недра, 1984, 464 с.
65. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М., Наука, 2001, 375 с.
66. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М., Мир, 1968, 368 с.
67. Жариков В.А. Основы физической геохимии. М., МГУ. 2005. 654 с.
68. Зверев В.П. Подземная гидросфера. Проблемы фундаментальной гидрогеологии. М., Научный мир, 2011, 260 с.
69. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник. Книги 1 - 6. М., Недра, 1994-1997.
70. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические прикладные и экологические аспекты. Изд. 2-е, доп. М., РАН, 2012, 677 с.
71. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М., Наука, 1990, 182 с.

72. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. Под ред. А.П.Соловова. М., Недра, 1990, 335 с.
73. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. 2-е изд. М., Изд-во Моск. Ун-та, 2000, 336 с.
74. Хендерсон П. Неорганическая геохимия. М., Мир, 1985, 339 с.
75. Ярошевский А.А. Проблемы современной геохимии. Новосибирск, Новосиб. Гос. Ун-т, 2004, 194 с.

Периодические издания:

1. Записки Российского минералогического общества
2. Новые данные о минералах
3. American Mineralogist
4. Canadian Mineralogist
5. European Journal of Mineralogy
6. Mineralogical Magazine
7. Reviews in Mineralogy and Geochemistry
8. Journal of Crystal Growth
9. Acta Crystallographica A, B, C

V. Дополнительная литература:

1. Волошин А.В. (1993): Тантало-ниобаты: систематика, кристаллохимия и эволюция минералообразования в гранитных пегматитах. СПб., Наука, 297 с.
2. Волошин А.В., Пахомовский Я.А. (1988): Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах. Л., Наука. 239 с.
3. Воронков А.А., Шумяцкая Н.Г., Пятенко Ю.А. (1978): Кристаллохимия минералов циркония и их искусственных аналогов. М., Наука, 181 с.
4. Высоцкий В.С., Сытников В.Е., Илюшин К.В., Ковалёв Л.К., Ковалёв К.Л., Егошкина Л.А. (2005) Сверхпроводимость в электромеханике и электроэнергетике. Электричество. 7. 31-41.
5. Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С., Кузнецов М.С., Семёнов А.О., Чурсин С.С. (2013) Современные методы получения матричных материалов для иммобилизации радиоактивных отходов. Известия высших учебных заведений. 56(4/2). 124-128.
6. Дятлова Е.М., Климош Ю.А. (2014) Химическая технология керамики и огнеупоров. Часть 1. Минск: БГТУ. 224 с.
7. Загорский В.Е., Макагон В.М., Шмакин Б.М., Макрыгина В.А., Кузнецова Л.Г. (1997): Гранитные пегматиты. Т. 2. Редкометалльные пегматиты. Новосибирск: Наука. 285 с.
8. Зубакова Л.Б., Тевлина А.С., Даванков А.Б. (1978) Синтетические ионообменные материалы. М. Химия. 184 с.
9. Кэди У. (1949) Пьезоэлектричество и его практическое применение. Пер. с англ. М.: Издательство ин. лит.
10. Лайнс М., Гласс А. (1981) Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Издательство «Мир»
11. Мнееян М.Г. (1991) Сверхпроводники в современном мире: Кн. Для учащихся. М.: Издательство «Просвещение»
12. Москальчук Л.Н., Баклай А.А., Леонтьева Т.Г., Стреленко Д.К. (2015) Сорбционные материалы на основе бентонитовой глины месторождения «Острожанское» для обеспечения безопасного обращения с радиоактивными отходами. Химия и технология неорганических веществ. 3. 70-77.
13. Нетрадиционные типы редкометалльного минерального сырья (1991). М., Недра, 248 с.

14. Пеков И.В., Кононкова Н.Н. (2010): Рубидиевая минерализация в редкометальных гранитных пегматитах Вороньих тундр (Кольский полуостров, Россия) // Геохимия, 7, 741-760.
15. Пожидаев Ю.Н. (2014) Кремнийсодержащие сорбционные материалы: синтез, свойства, применение. Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. 4(9). 7-37.
16. Пятенко Ю.А. (1990): Основные черты минералогической кристаллохимии лития // Изв. АН, сер. геол., 4, 67-74.
17. Пятенко Ю.А., Курова Т.А., Черницова Н.М., Пудовкина З.В., Блинов В.А., Максимова Н.В. (1999): Ниобий, тантал и цирконий в минералах. М.: Изд. ИМГРЭ, 213 с.
18. Пятенко Ю.А., Угрюмова Н.Г. (1988): Минералогическая кристаллохимия редкоземельных элементов // Изв. АН, сер.геол., 11, 75-86.
19. Садовский М.В. (2008) Высокотемпературная сверхпроводимость в слоистых соединениях на основе железа. Успехи физических наук. 178(12). 1243-1271.
20. Солодов Н.А., Балашов Л.С., Кременецкий А.А. (1980): Геохимия лития, рубидия и цезия. М.: Недра. 233 с.
21. Хомяков А.П. (1990): Минералогия ультраагпаитовых щелочных пород. М., Наука, 196 с.
22. Чесноков Н.В., Кузнецов Б.Н., Микова Н.М. (2013) Углеродные и композиционные материалы из природных графитов. Журнал Сибирского федерального университета.
23. Попов Г.М., Шафрановский И.И. Кристаллография, 5-е изд., М., изд-во Высшая школа, 1972, 352 стр.
24. Ворошилов Ю.В. Павлишин В.И. «Основы кристаллографии и кристаллохимии. Рентгенография кристаллов» Киев, КНТ, 2011. 568 стр.
25. Тепло- и массообмен при получении монокристаллов / П.К. Конаков, Г.Е. Веревошкин, Л.А. Горяинов и др. М: Изд. «Металлургия», 1971.

VI. Авторы программы:

1. Ерёмин Н.Н., чл-корр. РАН, дхн
2. Шванская Л.В., дхн
3. Гурбанова О.А. кхн
4. Кошуг Д.Г. профессор, д ф-м н
5. Гриценко Ю.Д. к г-м н
6. Борисов М.В. профессор д г-м н
7. Бычков А.Ю. профессор д г-м н
8. Лубкова Т.Н. к г-м н