

**Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**  
**Геологический факультет**

**Направление 020700 ГЕОЛОГИЯ**  
**Профиль ГЕОХИМИЯ**

**ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«Кристаллохимия»**

**Рекомендуется для направления подготовки**  
**020700 «Геология» *профиля Геохимия***)

Квалификация (степень) выпускника - бакалавр

Автор:  
**профессор Н.Н.Еремин**

**Москва 2011**

## **1. Цели и задачи дисциплины**

### Целями дисциплины Кристаллохимия являются:

- получение знаний об атомарном строении кристаллов, являющегося фундаментом для всестороннего изучения минералов, горных пород и руд, для понимания процессов минералообразования, для направленного синтеза кристаллов с заранее заданными свойствами;

- получение современных представлений о свойствах атомов и основных факторах, определяющих структуру кристалла;

- изучение взаимосвязи кристаллической структуры с физико-химическими свойствами кристаллов.

### Задачами дисциплины Кристаллохимия являются:

-изучение принципов современных методов моделирования и предсказания кристаллических структур и их физических свойств;

- обучение студентов приемам грамотной кристаллохимической интерпретации минералообразующих и геохимических процессов;

- освоение естественнонаучного базиса для последующего изучения минералогии, петрографии, геохимии, курса полезных ископаемых, литологии и других наук о веществе Земли.

## **2. Место дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина Кристаллохимия находится в блоке профильной подготовки вариативной части ООП (В.Г). Её освоение базируется на курсах блоков общенаучной подготовки базовой и вариативной части, входящих в модули Общая Геология, Физика, Высшая математика и Химия, а также на дисциплине «Кристаллография» профильной подготовки вариативной части ООП (В.Г). Курс является основой для дальнейшего освоения дисциплин блока профильной подготовки вариативной части (В.Г) «Минералогия», «Петрология», «Основы физической геохимии». Курс предоставляет возможность профессионального овладения современными проблемами, прогрессивными методами исследования, комплексной обработки и интерпретации экспериментального и теоретического материала в области кристаллографии, кристаллохимии, рентгеноструктурного анализа, физики и химии твердого тела, квантовой химии.

## **3. Требования к результатам освоения дисциплины**

Процесс изучения учебной дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций:

**универсальных**, в том числе:

*а) общекультурных (социально-личностных):*

– способность осознавать свою роль и предназначение в разнообразных профессиональных и жизненных ситуациях; умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности (ОК-1);

– умение переоценивать накопленный опыт, анализировать собственные достижения и перспективы самосовершенствования (ОК-2);

*б) общенаучных:*

– обладание знаниями о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук: физики, химии, биологии, наук о земле и человеке, экологии (ОНК-1);

– способность к поиску, критическому анализу, обобщению и систематизации научной информации, к постановке целей исследования (ОНК-2);

– владение методологией научных исследований в профессиональной области (ОНК-5);

– способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания в области физики (ОНК-6);

*в) инструментальных:*

– владение терминологией специальности на иностранном языке (ИК-2);

– владение навыками использования программных средств и работы в компьютерных сетях, использования ресурсов Интернет; (ИК-3);

– способность использовать профессиональные базы данных, работать с распределенными базами знаний (ИК-4);

– способность использовать современную вычислительную технику и специализированное программное обеспечение в научно-исследовательской работе (ИК-5);

*г) системных:*

– способность к творчеству, порождению инновационных идей, выдвижению самостоятельных гипотез (СК-1);

– способность к поиску, критическому анализу, обобщению и систематизации научной информации, к постановке целей исследования и выбору оптимальных путей и методов их достижения (СК-2);

– способность к самостоятельному обучению и разработке новых методов исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля деятельности; к инновационной научно-образовательной деятельности (СК-3);

– **профессиональных**, в том числе:

*общепрофессиональных, обязательными для всех профилей подготовки (в соответствии с видами деятельности):*

*научно-исследовательская деятельность:*

– способность самостоятельно осуществлять сбор геологической информации, использовать в научно-исследовательской деятельности навыки полевых и лабораторных исследований (ПК-1);

– способность глубоко осмысливать и формировать диагностические решения проблем геологии путем интеграции фундаментальных разделов геологии, геофизики, экологической геологии и специализированных геологических знаний (ПК-2);

– способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований и решать их с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-3);

– готовность в составе научно-исследовательского коллектива участвовать в составлении отчетов, рефератов, библиографий и обзоров по тематике научных исследований, в подготовке докладов и публикаций (ПК-4);

*производственно-технологическая деятельность:*

– способность применять на практике методы сбора, обработки, анализа и обобщения фондовой, полевой и лабораторной геологической информации (ПК-5);

– способность свободно и творчески пользоваться современными методами обработки и интерпретации комплексной геологической, геофизической, и эколого-геологической информации для решения научных и практических задач, в том числе находящихся за пределами непосредственной сферы деятельности (ПК-11);

*организационно-управленческая деятельность:*

– готовность к практическому использованию нормативных документов при планировании и организации полевых и лабораторных исследований (ПК-13);

– готовность участвовать в организации научных и научно-практических семинаров и конференций (ПК-14);

*проектная деятельность:*

– способность пользоваться нормативными документами, определяющими качество проведения полевых, лабораторных, вычислительных и интерпретационных геофизических, и эколого-геологических работ (ПК-15);

– готовность к проектированию комплексных научно-исследовательских и научно-производственных геологических работ (ПК-17);

*научно-педагогическая деятельность:*

– способность участвовать в руководстве работой школьников в области геологии (ПК-18);



1.	История науки. Основные задачи кристаллохимии. Основные способы описания и изображения атомного строения кристалла. Основные термины кристаллохимии. Свойства атомов, важные для кристаллохимии. Строение электронных оболочек. 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, магнитные свойства, кислотно-основные свойства атомов и ионов.	2	1-4	6	2		10	Собеседование на каждом семинаре, проверка ведения атласа кристаллических структур. Коллоквиум №1.
2.	Химическая связь в кристаллах. Основные типы химической связи. Потенциальная кривая химической связи. Энергия сцепления кристаллов. Степень ионности связи и ее структурное влияние. Общий взгляд на природу химической связи в кристаллах.	2	5-8	6	4		12	Собеседование на каждом семинаре, проверка ведения атласа кристаллических структур.
3.	Размеры и форма атомов в кристаллах. Атомные, Ван-дер-ваальсовы и ионные радиусы. Распределение электронной плотности и «кристаллические» радиусы атомов. Понятие об эффективных зарядах атомов в кристаллах и методах их определения. Поляризуемость ионов в кристалле.	2	9-12	4	2		10	Собеседование на каждом семинаре, проверка ведения атласа кристаллических структур. Коллоквиум №2.
4.	Промежуточная аттестация (2-ой семестр)	2						Зачет
5.	Основные категории теоретической кристаллохимии и соотношения между ними. Критерии устойчивости структурного типа для кристаллов с различным типом связи. Основной закон кристаллохимии.	3	1-4	6	2		10	Собеседование на каждом семинаре, проверка ведения атласа кристаллических структур. Коллоквиум №3.
6.	Гомологические ряды. Структуры вычитания и внедрения. Псевдосимметрия. Производные и вырожденные структуры. Полисоматизм. Модулярные структуры.	3	5-6	4	2		10	Собеседование на каждом семинаре, проверка ведения атласа кристаллических структур.
7.	Систематика полиморфных переходов. Структурные аспекты явления полиморфизма. Термодинамические основы теории полиморфизма. Политипизм. Способы описания политипных структур.	3	7-9	6	2		10	Собеседование на каждом семинаре, проверка ведения атласа кристаллических структур. Коллоквиум №4. Защита рефератов.
8.	Классификация изоморфизма. Физико-химические основы изоморфизма. Кристаллохимическая трактовка правил изоморфизма. Порядок-беспорядок в кристаллических структурах.	3	10-13	6	2		10	Собеседование на каждом семинаре, проверка ведения атласа кристаллических структур.
9.	Современные методы кристаллохимического прогноза. Возможные методы уточнения пробной структуры кристалла. Компьютерное моделирование структур и свойств кристаллов.	3	14-16	4	2		10	Собеседование на каждом семинаре, проверка ведения атласа кристаллических структур. Коллоквиум №5. Защита рефератов.
Промежуточная аттестация (по итогам 2 семестров)		3						Экзамен
Всего часов: 4 ЗЕ или 144 часа				42	18		84	

## 5. Рекомендуемые образовательные технологии

При освоении дисциплины Кристаллохимия активно используется образовательная **технология педагогических мастерских** - преподаватель создаёт атмосферу открытости, доброжелательности, сотворчества в общении, равен ученику в поиске знания, не торопится давать ответы на поставленные вопросы. Исключает официальное оценивание работы учащегося, но через социализацию, афиширование работ даёт возможность появления самооценки учащегося, её изменения, самокоррекции.

В курсе предусматривается широкое использование активных и интерактивных форм проведения занятий. Учащиеся знакомятся с современными методами изучения кристаллического вещества на макро- и микро-уровне. По результатам внеаудиторной работы (работа с литературными источниками, ресурсами Интернет, базами данных, моделями кристаллических структур) студенты под руководством преподавателя готовят решение индивидуальных задач по основным разделам дисциплины и защищают их на семинарах и коллоквиумах. Предусмотрены индивидуальные рефераты, наиболее удачные из которых используются в качестве справочного материала на официальной странице курса. Удельный вес лекций составляют 70% аудиторных занятий.

**При чтении лекций** используются *интерактивные лекции-визуализации* с выделением в визуальной форме основных понятий кристаллохимии.

**При проведении семинарских** занятий используются ролевые игры, имитирующие реальные задачи, имеющие практическую значимость.

## **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.**

### **6.1. Домашние задания для самостоятельной подготовки студентов**

- 1) План кристаллохимического описания кристаллической структуры:
  - а) Кристаллографическое описание:**
    - Определить ячейку Браве структуры.
    - Подсчитать, сколько атомов различного типа приходится на ячейку Браве, определить кристаллохимическую формулу соединения, число формульных единиц.
    - Определить взаимную координацию атомов, КЧ и КП для каждого сорта атомов.
    - Там, где возможно, – идентифицировать атомы разного сорта.
  - б) Кристаллохимическое описание структуры:**
    - Там, где возможно, - использовать термины плотнейшей упаковки.
    - Указать характер сочленения разнообразных структурных фрагментов.
    - Пояснить предпочтение атомов определенного сорта наблюдаемым позициям.
    - Указать, какие именно минералы кристаллизуются в этом структурном типе.
    - По возможности - сослаться на родственные структуры (производные, вырожденные, фазы вычитания и внедрения).
    - Указать на границы устойчивости структурного типа (существование

морфотропного ряда, гомологических связей с другими структурами, наличие полиморфных модификаций).

- Указать возможный изоморфизм в конкретных атомных позициях.
- Указать типы химических связей между атомами.

в) нарисовать кристаллическую структуру в плане, выделив контуры элементарной ячейки и обозначив высоты (координаты  $z$ ) атомов.

з) Нарисовать репрезентативный фрагмент структуры в компьютерной программе-визуализаторе (ATOMS, Diamond и др.).

2) Примерный список вопросов и задач по материалу:

- Дайте описание пространственной решетки, узлового ряда и узловой сетки
- В чем особенности ячейки Браве? Опишите правила ее вывода.
- Чем отличаются понятия «решетка» и «структура»?
- Дайте определение правильной системы точек.
- Дайте определение пространственной группы симметрии, порядка и кратности группы.
- В чем отличие кубической и гексагональной плотнейшей упаковки. Чему равен коэффициент заполнения пространства у обеих упаковок?
- Объясните, почему для обозначения плотнейшей упаковки любой сложности достаточно использовать всего три буквы – А, В, С?
- Дайте определение координационного числа и координационного полиэдра. Как определить КЧ аниона, зная КЧ катионов в структуре?
- Как можно разделить структуры по их мотиву?
- В чем преимущество полиэдрической модели перед шариковой?
- В чем отличие изоструктурности от изотипности?
- Какую информацию можно получить из кристаллохимической формулы?
- Из каких двух основных частей состоит волновая функция электрона?
- Какова форма и симметрия волновых функций с разными орбитальными квантовыми числами?
- Какими функциями описывается распределение электронной плотности?
- Что такое орбитальный радиус электронной оболочки? Что такое орбитальный радиус атома или иона?
- Дайте определения принципа Паули и правила Гунда.
- Назовите основные принципы заполнения электронных уровней атомов. Какова их связь с периодичностью свойств химических элементов в Системе Менделеева?
- Укажите основные группы элементов по строению их электронных оболочек. Что лежит в основе разделения элементов на  $a$  и  $b$  подгруппы?
- Какие свойства характеризуют энергию связи валентных электронов с атомным остовом?
- Какая связь существует между размерными и энергетическими характеристиками электронных оболочек?
- Для чего вводятся понятия валентного состояния атома и гибридизации валентных орбиталей? Можно ли дать их строго физическое обоснование или они должны рассматриваться как вспомогательные, облегчающие понимание валентности понятия?
- Дайте определение орбитальной электроотрицательности. Какое свойство атома характеризует эта функция? Как понятие валентного состояния атома связано с орбитальной электроотрицательностью?
- Что характеризует поляризуемость атома или иона? С каким атомным свойством она ближе всего связана?



- На какие группы делятся атомы по их магнитным свойствам? Какие атомы и ионы имеют постоянный магнитный момент?
- В рамках какой теории кислот и оснований можно приписать атомам и ионам кислотно-основные свойства? Какие характеристики или свойства атомов (ионов) используются для построения шкалы кислотности-основности?
- На какие основные типы можно разделить химические связи в кристаллах?
- Как суммируется электростатическая энергия взаимодействия между ионами в кристалле? Что такое константа Маделунга, от чего она зависит и что она характеризует?
- Какими эмпирическими законами описывается энергия отталкивания между ионами в кристалле?
- Дайте определение понятия «энергия решетки» и напишите основные уравнения для этой величины.
- Запишите цикл Борна-Габера для экспериментального определения энергии решетки.
- В чем причина особого поведения ионов переходных металлов в кристаллическом поле? Что такое энергия стабилизации и как она определяется для координационных полиэдров разного типа?
- В чем состоит разница между высоко- и низкоспиновым состояниями? Какова природа энергии предпочтения октаэдрической координации перед тетраэдрической для ионов переходных металлов и как она управляет структурой таких кристаллов, как нормальные и обращенные шпинели?
- Приведите основные характеристики ковалентной связи в сравнении с ионной. В чем заключается структурное различие между ними? Дайте определение правила Юм-Розери и несколько примеров структур для его иллюстрации.
- Почему кремний и германий имеют только одну кристаллическую структуру типа алмаза, а углерод широко представлен двумя модификациями – структурами алмаза и графита? Какова причина столь резкого различия свойств этих двух модификаций?
- В чем причина резкого различия химии и кристаллохимии углерода – основы органических соединений («царства живого вещества»), и кремния - основы кремнезема и силикатов (главных представителей «царства минералов»)?
- Как можно описать промежуточные между ионными и ковалентными связи, что такое степень ионности? Определите понятие «электроотрицательность» и укажите способы его отыскания. Обрисуйте основные черты изменения значений электроотрицательности элементов в группах и периодах Периодической Системы.
- Опишите основные черты энергетического зонного строения металлов, полупроводников и диэлектриков. Почему столь различны электрические свойства гомологов по 4-ой группе: углерод (алмаз) – изолятор, кремний, германий и серое олово – полупроводники, белое олово и свинец – металлы?
- Почему одни одновалентные элементы (водород и галоиды) образуют молекулярные кристаллы, а другие одновалентные элементы (щелочные элементы, медь, серебро, золото) – металлические кристаллы?
- Как можно охарактеризовать происхождение энергии сцепления и основные черты структур металлов с помощью моделей «желе» и «электронного газа»?
- Что можно сказать о структурах и свойствах металлоидов - простых веществ, переходных между ковалентными и металлическими? Почему висмут при плавлении сжимается?
- В результате каких электронных взаимодействий возникает Ван-дер-ваальсова связь, в каких кристаллах она определяет их структуру и какую? Присутствует ли она в других веществах и почему?

- Почему с возрастанием атомного номера температуры плавления молекулярных кристаллов галоидов растут, а щелочных металлов – уменьшаются?
- Водородная связь, ее происхождение и свойства. Как водородная связь действует в структуре льда?
- Что является причиной огромной роли и большой распространенности водородной связи в структурах органических веществ и минералов, образующихся на поверхности Земли?
- Почему в гомологическом ряду  $\text{H}_2\text{O}$  -  $\text{H}_2\text{S}$  -  $\text{H}_2\text{Se}$  -  $\text{H}_2\text{Te}$  лед обладает аномально высокой температурой плавления? Каковы структурные причины увеличения плотности при плавлении льда?
- Укажите приблизительное соотношение между энергиями ионной (ковалентной, металлической), водородной и Ван-дер-ваальсовой связей.
- Какие характеристики различных типов химической связи в кристаллах являются общими, а какие отличают их друг от друга? Имеются ли различия в физических свойствах этих основных групп кристаллов и какие?
- Приведите примеры кристаллов, в которых атомы связаны одновременно с помощью нескольких различных типов химической связи.
- Какие подходы использовались при выводе основных систем ионных радиусов? Кто были их создатели?
- Каким образом выводились основные систематики атомных радиусов?
- От каких факторов зависит величина ионного радиуса?
- Дайте определение Ван-дер-ваальсовых радиусов.
- Что такое кристаллический радиус атома?
- Каким образом можно оценить эффективный заряд атома в кристалле?
- Рассчитайте радиус атома меди, если известно, что параметр элементарной ячейки Cu равен  $3,61 \text{ \AA}$ .
- Рассчитайте нижний предел устойчивости катиона в тетраэдрической координации.
- Рассчитайте нижний предел устойчивости катиона в октаэдрической координации.
- Рассчитайте нижний предел устойчивости катиона в квадратной координации.
- $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  – полностью обращенная шпинель. Определите валентность и координационное окружение атомов железа, если известно, что в одной элементарной ячейке содержатся 16 кислородных октаэдров, а валентность атомов Mg равна 2.
- $\text{FeAl}_2\text{O}_4$  – нормальная шпинель. Определите координационное окружение каждого катиона и валентность железа, если известно, что в одной элементарной ячейке шпинели 16 кислородных октаэдров, а валентность атомов Al равна 3.
- В энстатите  $\text{MgSiO}_3$  атомы Mg занимают октаэдрические (КЧ=6), а Si - тетраэдрические (КЧ = 4) позиции. Найти КЧ (O).
- Рассчитайте константу Маделунга для кристаллов а) NaCl; б) MgO в приближении 2-ой координационной сферы центрального атома.
- Рассчитайте константу Маделунга для кристалла CsCl в приближении 2-ой координационной сферы центрального атома.
- Рассчитайте константы Маделунга для кристалла  $\text{Li}_2\text{O}$  в приближении 2-ой координационной сферы центрального катиона, центрального аниона.
- Рассчитайте константу Маделунга для кристалла  $\text{CaF}_2$  в приближении 2-ой координационной сферы центрального катиона, центрального аниона
- Энергия решетки элементарной ячейки NaCl = -32.60 эВ. Рассчитайте значение энергии атомизации кристалла, используя данные Приложения 1-2.
- Связь Ti-O в рутиле  $\text{TiO}_2$  на 52% ионная. Определите валентности и эффективные заряды всех атомов, образующих это соединение.
- Связь Si-O в стишовите  $\text{SiO}_2$  на 49% ионная. Определите валентности и

- эффективные заряды всех атомов, образующих это соединение.
- Электроотрицательность лития (по Полингу) равна 1 и его сродство к электрону  $F=0.4$  эВ. С помощью формулы Малликена оцените его первый потенциал ионизации.
  - Электроотрицательность фтора (по Полингу) равна 4 и его потенциал ионизации  $I=17.4$  эВ. С помощью формулы Малликена оцените его сродство к электрону.
  - В структуре NaCl ионы Cl образуют кубическую плотнейшую упаковку из несжимаемых шаров. Параметр элементарной ячейки NaCl = 5.65 Å. Определите ионный радиус  $\text{Na}^+$ , если ионы Cl соприкасаются друг с другом.
  - Энергия решетки  $U$  элементарной ячейки стишовита  $\text{SiO}_2$  равна -259 эВ. Рассчитайте значение энергии атомизации кристалла. Последовательные потенциалы ионизации кремния равны:  $I_1=8$  эВ,  $I_2=15$  эВ,  $I_3=23$  эВ,  $I_4=57$  эВ. Значения сродства к электрону для кислорода равно:  $F_1=1,5$  эВ,  $F_2=-9$  эВ.
  - Во сколько (примерно) раз менее поляризуем  $\text{Be}^{2+}$  (ионный радиус 0.3 Å) чем  $\text{I}^-$  и  $\text{Br}^-$  с ионными радиусами (2.1 Å) и (1.8 Å), соответственно?
  - Берлинит  $\text{AlPO}_4$  - изоструктурный аналог кварца, в котором половина атомов Si замещена на Al, а половина на P. Исследования распределения электронной плотности выявили, что заряд Al меньше формальной валентности в 3 раза, а интегрирование электронной плотности в области кислорода привело к величине 8,6 e. Определите величины эффективных зарядов атомов.
  - Запишите кристаллохимическую формулу фаялита  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , если известно, что в этом силикате анионы образуют плотнейшую гексагональную упаковку. Известно также, что в этой ГПУ занято 1/8 тетраэдрических пустот, а атомы железа занимают половину октаэдрических пустот.
  - Дайте определения основных категорий кристаллохимии.
  - Почему взаимосвязь между категориями удобно изображать в виде тетраэдра?
  - Какие наблюдения подвели П.Грота к введению понятия «морфотропия»?
  - Сформулируйте принципы, которым должны подчиняться стабильные структуры существенно ионных кристаллов.
  - В чем геометрический смысл правил Магнуса-Гольдшмидта и 1-ого Правила Полинга?
  - Какой фундаментальный принцип отражает второе правило Полинга?
  - Какие с точки зрения 2-ого правила Полинга максимальные отклонения допустимы от суммы валентных усилий для существования устойчивой кристаллической постройки?
  - Возможно ли применять 2-ое правило Полинга для структур с существенной долей ковалентности связи?
  - Каким образом можно выделить первую координационную сферу центрального атома?
  - Во сколько раз вырастут силы отталкивания, если тетраэдры соединить не по вершине, а по ребру (по грани)?
  - Во сколько раз вырастут силы отталкивания, если октаэдры соединить не по вершине, а по ребру (по грани)? Каким образом кристалл компенсирует это увеличение сил отталкивания?
  - В чем геометрический смысл фактора толерантности?
  - В чем (с точки зрения фактора толерантности) причина неупорядоченного вхождения различных катионов как в тетраэдрическую так и в октаэдрическую позицию структуры шпинели?
  - На чем основано деление кристаллохимии силикатов на 2 главы: «Брэгговскую» и «Беловскую»?
  - В чем практическая польза введения Гольдшмидтом понятия «модельных

структур»?

- В какие правила трансформируется правило Юм-Розери для простых веществ в случае бинарных соединений типа  $M_kX_l$ ?
- Приведите примеры поликатионных и полианионных кристаллических соединений. Каковы их структурные особенности?
- Почему помимо числа 18 Белов ввел еще одно «магическое число 13(14)?
- Как были объяснены отличия между структурными типами  $FeS_2$ , с одной стороны и  $MoS_2$  и  $CdI_2$ , с другой стороны?
- К каким структурным образованиям ведет избыток валентных электронов катионов? Приведите примеры.
- В чем особенность кристаллохимии существенно ковалентных соединений с неполновалентными катионами? Приведите примеры.
- До каких пор атом кремния устойчиво сохраняет в структуре тетраэдрическую координацию? В каком случае он меняет ее на октаэдрическую?
- Поясните действие правила взаимного влияния связей на примере силикатов.
- В чем выражается родственность структур  $CdI_2$ - $NiAs$ - $Ni_2In$ ?
- В чем выражается родственность структур  $WO_3$  и перовскита?
- Каковы структурные причины существования гибридных построек – биопириболов?
- Напишите последовательный ряд вырожденных структур для станнина.
- Напишите последовательный ряд производных структур от структурного типа лонсдейлита.
- Какие полиэдры могут возникнуть, если удалить одну или две вершины у куба? Приведите примеры соединений с такими полиэдрами.
- В чем отличие реконструктивных и дисторсионных переходов?
- Возможно ли изменить первое координационное число без разрыва химических связей? Если возможно, то каким образом? Приведите примеры.
- Что такое переход Вервея?
- К каким типам полиморфных переходов относятся следующие структурные превращения:  $\alpha$ -кварц –  $\beta$ -кварц – тридимит – кристобалит – стишовит?
- Увеличивается или уменьшается симметрия при образовании сверхструктур?
- Увеличивается или уменьшается симметрия при появлении эффектов вращения радикалов?
- В чем причина резкого скачка объема элементарной ячейки  $Se$  под действием давления около 7 кбар?
- В чем причина резкого скачка объема элементарной ячейки гематита под действием давления около 500 кбар?
- В чем заключаются структурные причины повышения симметрии более высокотемпературных полиморфных модификаций?
- Приведите примеры понижения симметрии более высокотемпературных полиморфных модификаций.
- Как влияет давление на структуры полиморфных модификаций?
- Как объяснить увеличение под действием давления поля стабильности киновари  $HgS$  (первые координационные числа 2 и 2) относительно метациннабарита (первые координационные числа 4 и 4)?
- Какие параметры являются более правильными, чем КЧ, характеристиками относительной плотности структуры?
- В чем причины резкого преобладания среди минералов кристаллов низших и средних сингоний? Отличается ли симметричная статистика минералов от статистики неорганических соединений?

- Каковы принципиальные особенности потитипии, не позволяющие ее классифицировать как полиморфизм
- Опишите с помощью символов Жданова 15 слойную модификацию карборунда ABCBACABACBACBACB. В чем состоит принцип его символики?
- Опишите с помощью символов Полинга 21 слойную модификацию карборунда ABCACBACABCBACBCCABACB. В чем состоит принцип его символики?
- В чем отличия понятий «изоморфная смесь» и «твердый раствор замещения»?
- В чем отличия понятий «изоморфизм», «изотипность» и «изоструктурность»?
- Какие кристаллы Митчерлих считал изоморфными и почему?
- Опишите возможные схемы гетеровалентных замещений без изменения общего числа атомов в элементарной ячейке.
- Опишите два основных вида гетеровалентных замещений с изменением числа атомов в ячейке. Насколько принципиально они отличаются друг от друга?
- В чем отличие правила Вегарда и Ретгерса?
- Какими, согласно Гольдшмидту и Юм-Розери, могут быть максимальные геометрические различия между изоморфными атомами?
- Приведите примеры правила полярности изоморфизма.
- На что может указывать знакопеременный характер отклонения от правила Вегарда?
- Кто должен легче входить в чужую кристаллическую структуру:  $\text{Na}^+$  в сильвин  $\text{KCl}$ , или  $\text{K}^+$  в галит  $\text{NaCl}$ ? Обоснуйте ответ.
- Приведите примеры действия правил ассистирования и депрессии.
- В чем заключается эффект улавливания микропримеси?
- Какие два фактора обеспечивают разные типы диаграмм состояния бинарной смеси?
- В чем состоят причины неодинаковой распространенности минералов и неорганических соединений по различным сингониям?
- Каким образом можно сконструировать пробную структуру кристалла определенного состава?
- Каким образом можно уточнить пробную структуру кристалла определенного состава?

3) Список кристаллических структур к изучению: Ag, Al, Au,  $\alpha$ -железо,  $\alpha$ -кварц,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\beta$ -BeO,  $\beta$ -латунь,  $\text{Ca}(\text{BO}_3)_2$ , CdI<sub>2</sub>-2сл, CdI<sub>2</sub>-3сл, Ce, Cs, CsCl, Cu<sub>3</sub>Au, CuAu, GeO<sub>2</sub>,  $\gamma$ -железо, HgSe, KDP, KTP, Li<sub>2</sub>O, LiOH, Ni<sub>2</sub>In, Pb, PI<sub>2</sub>, RbNO<sub>3</sub>, ReO<sub>3</sub>, ReS<sub>2</sub>, SCl, ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>, ZnP<sub>2</sub>, агрон, алабандин, александрит, аллеганит, алмаз, альбит, альмандин, анатаз, андаллузит, андрадит, анортит, антигорит, апатит-беловит, арагонит, аргутит, арсенолит, аурустибит, бадделеит, баотит, барит, беловит, бёмит, бенитоит, берилл, биксбиит, борнитрид, броммелит, брукиит, брусит, ванадомалаяит, висмут, витерит, волластонит, вульфенит, вюртцит, вюстит, галенит, галит, гафнон, гафнон, гейкилит, гексастаннин, гелий, гематит, георгбокиит, германий, гётит, гиббсит, гидраргиллит, гипс, гранаты, граутит, графит 2 сл, графит 3 сл, гринокит, гроссуляр, гумит, джерригиббсит, диаспор, диопсид, диоптаз, доломит, известь, ильменит, йод (хлор), каламин, кальциоборит, кальцит, каолинит, карбид кальция, карборунд, карелианит, касситерит, квазикристаллы (сплавы), кианит, киноварь, киноит, клиногумит, кнориингит, кноррингит, корунд, коттунит, коффинит, коэсит, кремний, кристобалит, ксенотим, кубанит, куперит, куприт, лабрадор, лантан, лед, лейкофёницит, лепидокрокит, литвинскит, лонсдейлит, магнезит, магнетит, магний, малаяит, мангангумит, марказит, медь, метациннобарит, микроклин, миллерит, молибденит, муассонит, мусковит, мышьяк, накафит, никелин, норбергит, оливин, олово-белое, олово-серое, ольдгамит, ортоклаз, отавит, периклаз, перовскит,

пирит, пиролюзит, пироп, пирофанит, пирофиллит, пирохлор, пирротин, повеллит, полоний, полуцит, псевдобрукит, реальгар, риббеит, рингвудит, родохрозит, ртуть, рутил, санидин, сейдозерит, селен, селлаит, сенамортит, сера (2 модификации), сидерит, силлиманит, сильвин, смитсонит, содалит, соналит, спессартит, станнин, стишовит, стронцианит, сурьма, сфалерит, сфен, талантит, тальк, таусонит, теллур, тетраэдрит, тефроит, титан, топаз, торит, тортвейтит, тремолит, тридимит, троилит, турмалин, уваровит, уголекислота, уранинит, урусовит, фазы Лавеса, фаялит, фенакит, флогопит-биотит, флюорит, форстерит, фуллерены (модификации), халькопирит, хондродит, хризоберилл, хризотил, хромит, целестин, церрусит, циммофан, цинк, цинкит, циркон, цоизит, шеелит, шпинели, энстатит, эсколаит

## **6.2. Контроль усвоения материала.**

Контроль усвоения пройденного материала осуществляется на нескольких уровнях. Контроль на всех уровнях выражается в индивидуальной балльно-рейтинговой системе оценки знаний учащихся.

Текущий контроль осуществляется путем непосредственного контакта преподавателя с каждым студентом во время семинарских и индивидуальных занятий, путем проверки, анализа и обсуждения персональных справочных тетрадей (атласов кристаллических структур).

Предусмотрено 5 коллоквиумов по завершённым темам:

Коллоквиум №1 – письменный тест по темам: «Эволюция кристаллохимических идей», «Свойства свободных атомов и ионов» - включает в себя 8 вопросов, кристаллохимическое описание структуры согласно списку, расчетную задачу по пройденному материалу. В суммарную оценку за коллоквиум также входит текущее ведение персонального атласа кристаллических структур.

Коллоквиум №2 - письменная работа по темам «Химическая связь» и «Свойства атомов в кристалле» - включает в себя теоретический вопрос, кристаллохимическое описание структуры согласно списку, расчетную задачу по пройденному материалу. В суммарную оценку входит текущее ведение персонального атласа кристаллических структур, также оцениваются персональные навыки работы в программах визуализации кристаллических структур.

Коллоквиум №3 - письменная работа по теме «Морфотропия» - включает в себя теоретический вопрос, кристаллохимическое описание структуры согласно списку, расчетную задачу по пройденному материалу. В суммарную оценку входит текущее ведение персонального атласа кристаллических структур

Коллоквиум №4 - письменная работа по теме «Полиморфизм и политипия» - включает в себя теоретический вопрос, кристаллохимическое описание структуры согласно списку, расчетную задачу по пройденному материалу. В суммарную оценку за коллоквиум входит

текущее ведение персонального атласа кристаллических структур и сдача первого персонального задания (реферата).

Коллоквиум №5 - письменная работа по темам «Изоморфизм», «Структурная гомология», «Методы кристаллохимического прогноза» - включает в себя теоретический вопрос, кристаллохимическое описание структуры согласно списку, расчетную задачу по пройденному материалу. В суммарную оценку за коллоквиум входит текущее ведение персонального атласа кристаллических структур и сдача второго персонального задания (реферата).

Зачет - после 2-го семестра.

Экзамен - после 3-го семестра.

### **6.3. Контрольные вопросы для промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины (при проведении экзамена):**

1. Основные вехи истории кристаллохимии. Кристаллохимия среди других наук о веществе. Основные задачи кристаллохимии.
2. Свойства атомов, важные для кристаллохимии: угловая форма орбиталей, орбитальные радиусы, потенциалы ионизации и сродство к электрону, орбитальные электроотрицательности, поляризуемость, кислотно-основные свойства.
3. Построение периодической системы элементов: принцип Паули, правило Гунда.
4. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Периодическая зависимость от порядкового номера  $Z$ . Химические свойства и классификация элементов: металлы, полуметаллы и неметаллы.
5. Понятие об электроотрицательности. Шкала электроотрицательности Полинга. Связь электроотрицательности с потенциалом ионизации и сродством к электрону (формула Малликена). Степень ионности связи и разность электроотрицательностей.
6. Поляризуемость атомов и ионов. Ее связь с размерами атомов и ионов. Слоистые структуры как результат поляризации анионов.
7. Структуры гомодесмические и гетеродесмические. Структурные мотивы, примеры структур с разными мотивами.
8. Координационные полиэдры и координационные числа. Связи между координационными числами разных атомов в структуре. Среднее координационное число.

9. Структурный тип. Изоструктурность, изотипность, структурный класс. Гомеотипия.
10. Структурные единицы кристалла. Мотив структуры. Кристаллохимические формулы.
11. Эффективные радиусы ионов. Критерии вывода радиусов Ланде, Гольдшмидта, Полинга.
12. Зависимость ионного радиуса от заряда, координационного числа, спинового состояния.
13. Периодические зависимости ионных радиусов. Лантаноидное сжатие.
- Атомные и ковалентные радиусы. Их периодические зависимости. Соотношение между атомными и ионными радиусами
14. Ван-дер-ваальсовы радиусы.
15. Распределение электронной плотности и «кристаллические» радиусы атомов. Сжатие аниона и расширение катиона в кристаллическом поле.
16. Эффективные заряды атомов в кристалле и методы их определения
17. Структурные особенности разных типов связи: ионной, ковалентной, металлической, ван-дер-ваальсовой
18. Ионная связь. Энергия решетки ионных кристаллов.
19. Цикл Борна-Габера. Формулы Борна-Майера и Борна-Ландэ
20. Энергия связи в кристаллах: энергия решетки, энергия атомизации. Потенциальная кривая химической связи
21. Переходные типы химической связи в кристаллах. Степень ионности химической связи и разность электроотрицательностей. Структуры кристаллов, переходные от ионных к ковалентным.
22. Переходные типы химической связи в кристаллах. Структуры, переходные между металлическими и ковалентными.
23. Металлическая связь. Радиусы Металлических атомов. Основные структуры металлов.
24. Остаточная (вандерваальсова) связь. Ван-дер-ваальсовы радиусы. Молекулярные кристаллы.
25. Диполь-дипольные взаимодействия. Поляризация аниона в низкосимметричных позициях структуры (пример: O в структуре шпинели). Причина образования слоистых структур: структурные типы  $CdI_2$  и  $MoS_2$
26. Водородная связь. Строение кристаллогидратов. Структура льда. Структуры гидроксидов. Конфигурационная энтропия льда.



27. Элементы теории кристаллического поля. Спиновое состояние. Ионы переходных металлов в кристаллическом поле. Расщепление  $d$ -электронов в октаэдрическом окружении. Предпочтение иона переходного металла к октаэдру или тетраэдру. Энергия стабилизации в кристаллическом поле. Радиусы ионов переходных металлов в высокоспиновом и низкоспиновом состояниях.
28. Кислотно-основные свойства атомов и ионов
29. Современные методы кристаллохимического прогноза. Критерии и принципы конструирования пробных структур.
30. Современные методы кристаллохимического прогноза. Возможные эмпирические методы уточнения пробных структур.
31. Современные методы кристаллохимического прогноза. Возможности атомистического полуэмпирического моделирования.
32. Современные методы кристаллохимического прогноза. Метод валентности связи.
33. Современные методы кристаллохимического прогноза. Метод DLS.
34. Современные методы кристаллохимического прогноза. Расчеты из первых принципов. Возможности и ограничения метода.
35. Симметричная статистика минералов и неорганических соединений.
36. Современное программное обеспечение структурного моделирования различными методами.
37. Структурно несовершенные кристаллы. Классификация дефектов кристаллической структуры.
38. Эффект улавливания микропримеси.
39. Возможности моделирования структурных несовершенств кристалла.
40. Анионо-центрированная кристаллохимия.
41. Основы количественной теории изоморфизма. Принципы расчета областей распада изоморфных смесей. Возможные методы моделирования смесимости в твердых телах.
42. Локальная структура твердых растворов замещения. Понятия виртуального кристалла, модель чередования связей. Податливость позиции.
43. Внешние факторы изоморфизма. Влияние температуры и давления на изоморфизм
44. Внутренние факторы изоморфизма: роль различия свойств атомов (ионов) на смесимость.
45. Физико-химические основы изоморфизма. Роль энтропии и энтальпии смешения.
46. Соотношение между термодинамическими функциями смешения и типами диаграмм состояния на примере двухкомпонентной системы.

47. Критическая температура распада и ее связь с энергией смещения.
48. Изоморфные ряды. Роль лантанидного сжатия в изоморфизме.
49. Изоморфизм, определение, история открытия и изучения. Классификация.
50. Эмпирические правила изоморфизма (Вегаарда, Ретгерса, Гольдшмидта, Юм-Розери).
51. Правило полярности изоморфизма Гольдшмидта для гомо- и гетеровалентных замещений.
52. Диагональные ряды и звезды изоморфизма Ферсмана.
53. Полярность изоморфизма, влияние общей структурной единицы на смесимость
54. Структурная гомология. Производные и вырожденные структуры.
55. Структурная гомология. Фазы вычитания и внедрения.
56. Структурная гомология. Полисоматические серии на примере ряда сейдозерит-накафит
57. Структурная классификация полиморфизма.
58. Полиморфные переходы 1 типа
59. Полиморфные переходы 2 типа
60. Полиморфные переходы 3 типа
61. Полиморфные переходы 4 типа
62. Полиморфные переходы 5 типа
63. Полиморфизм: определение, история открытия и изучения
64. Политипизм. Отличие от полиморфизма. Основные способы обозначения. Примеры.
65. Изменение симметрии кристалла при изменении Т и Р. Координационные правила полиморфизма.
66. Критерии устойчивости структурного типа для ковалентных кристаллов. Диаграмма Музера-Пирсона
67. Критерии устойчивости структурного типа для ковалентных кристаллов. Правила Юм-Розери, Грима-Зоммерфельда, Музера-Пирсона
68. Критерии устойчивости структурного типа для ковалентных кристаллов. Обобщенное правило Пирсона для сложных соединений.
69. Критерии устойчивости структурного типа для ковалентных кристаллов. 1 и 2 правило Партэ
70. Критерии устойчивости структурного типа для ковалентных кристаллов. Числовые законы Белова
71. Фактор толерантности для АВХЗ

72. Фактор толерантности для АВ<sub>2</sub>X<sub>4</sub>
73. Модельные структуры Гольдшмидта
74. Морфотропный ряд силикатов
75. Локальный баланс валентностей (второе правило Полинга), примеры.
76. Критерии устойчивости структур ионных кристаллов. Первое правило Полинга. Правило Магнуса-Гольдшмидта
77. 3, 4 и 5-ое правило Полинга
78. Основной закон кристаллохимии в формулировке Гольдшмидта и его современное понимание.
79. Основные категории кристаллохимии и соотношения между ними. «Тетраэдр» кристаллохимии.
80. Морфотропия. История изучения. Её закономерности (отношение радиусов катиона и аниона, поляризуемость и т.п).

## **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **а) основная литература:**

- 1) Урусов В.С., Еремин Н.Н. «Кристаллохимия. Краткий курс» М., Изд-во МГУ, 2010, 258 стр.
- 2) Загальская Ю.Г., Литвинская Г.П., Егоров-Тисменко Ю.К. Руководство к практическим занятиям по кристаллохимии, М. изд-во МГУ, 1983, 167 стр.

### **б) дополнительная литература:**

- 1) Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М., Недра, 1976.
- 2) Бокий Г.Б. Кристаллохимия. М., Наука, 1973.
- 3) Ворошилов Ю.В. Павлишин В.И. «Основы кристаллографии и кристаллохимии. Рентгенография кристаллов» Киев, КНТ, 2011. 568 стр.
- 3) Егоров-Тисменко Ю.К. «Кристаллография и кристаллохимия», М, изд-во Книжный дом «Университет», 2005, с.520
- 4) Современная кристаллография, т. 2. Структура кристаллов. /Ред. Б.К. Вайнштейн. М., Наука, 1979.
- 5) Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М., МГУ, 1987.

### **в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

- <http://cryst.geol.msu.ru/courses/crchem/> - официальная страница курса;
- <http://database.iem.ac.ru/minicryst/> - база данных кристаллических структур МИНКРИСТ;
- <http://www.shapesoftware.com/> - программное обеспечение для визуализации кристаллов и кристаллических структур;
- <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php> - база данных кристаллических структур American Mineralogist.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Для проведения занятий: интерактивных лекций-визуализаций, презентаций рефератов на семинарах – используется LCD проектор.

Для самостоятельной работы студентов используется компьютерный класс с выходом в Интернет, коллекция кристаллических структур кафедры кристаллографии и кристаллохимии, доступная через учебный кабинет кафедры, доступ с базам данным по кристаллохимии и структурным данным, программное обеспечение для решения задач кристаллохимических задач, библиотека геологического факультета МГУ.

Для интерактивной самоподготовки используется компьютер с выходом в Интернет

## **9. Краткое содержание дисциплины (аннотация)**

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 микросимметрии. 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. Полисоматизм. Концепция полисоматизма и полисоматических серий. Описание модулярных (фрагментарных) кристаллических структур. 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 (МВС). Возможные методы уточнения пробной структуры кристалла. Компьютерное моделирование с использованием атомистических потенциалов межатомного взаимодействия. Квантовохимические расчеты (ab-initio).

## Разработчик

МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический ф-т профессор Еремин Н.Н. тел. 939-3875  
neremin@geol.msu.ru

## Эксперты:

\_\_\_\_\_ (место работы)

\_\_\_\_\_ (занимаемая должность)

\_\_\_\_\_ (инициалы, фамилия)

Программа одобрена на заседании Ученого совета Геологического факультета МГУ  
(протокол №     от     )