

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

УТВЕРЖДАЮ
и.о. декана Геологического факультета
чл.-корр. РАН _____/Н.Н.Ерёмин/
«__» _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Введение в структурную петрологию

Автор-составитель: Шкурский Б.Б.

Уровень высшего образования:
Бакалавриат

Направление подготовки:
05.03.01 Геология

Направленность (профиль) ОПОП:
Геохимия

Форма обучения:
Очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Учебно-методическим Советом Геологического факультета
(протокол № _____, _____)

Москва

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки «Геология», (программы бакалавриата, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки).

Год (годы) приема на обучение: 2022

© Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения факультета.

Цель и задачи дисциплины

Целью курса "Введение в структурную петрологию" является формирование у студентов основ системного понимания связи структур и текстур эндогенных горных пород с условиями петрогенезиса, овладение инструментальными методами анализа пространственного строения пород и способами содержательной интерпретации его результатов.

Задачи:

- 1) Ознакомление со структурными и текстурными характеристиками магматических и метаморфических пород, способами их описания и измерения.
- 2) Получение представлений о количественных моделях структурообразующих процессов, о факторах преобразования первичных структур и текстур магматических и осадочных пород в процессах метаморфизма.
- 3) Ознакомление с ведущими механизмами деформации и перекристаллизации порообразующих минералов, определяющими их предпочтительную ориентировку;
- 4) Освоение федоровского метода применительно к микроструктурному анализу.
- 5) Введение в методы анализа распределений размеров зерен и частот их контактов, их формы и анатомии, ориентировки и характера межзеренных границ.

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Курс "Введение в структурную петрологию" формирует знания о факторах и механизмах формирования и преобразования структур и текстур эндогенных горных пород. Уделяется внимание традиционным и современным методам сбора и интерпретации структурно-петрологической информации. Изложение теоретического материала носит обзорный характер и направлено на формирование способности ставить задачи и выбирать направление и методы структурно-петрологических исследований. Отдельные аспекты теории, включающие способы количественного описания элементов пространственного строения пород, рассматриваются более детально, в связи с методами, осваиваемыми студентами в ходе практических занятий: универсальный федоровский метод, ИСА, ДОЭ и другие.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО – вариативная часть, профессиональный цикл, профессиональные дисциплины по выбору, курс – III, семестр – 6.

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

освоение дисциплин «высшая математика», «физика», «основы физической геохимии», «структурная геология и геокартирование», «кристаллография», «минералогия», «петрология» (семестры 4 и 5).

Дисциплина необходима в качестве предшествующей для дисциплин «Экологическая геохимия», «Промышленная экология», дисциплин магистерской программы «Экологическая геология», а также для научно-исследовательской работы и выполнения выпускных квалификационных работ.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

Компетенции выпускников (коды)	Индикаторы (показатели) достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), сопряженные с компетенциями
ОПК-2.Б Способен применять теоретические основы фундаментальных геологических дисциплин при решении задач	Б.ОПК-2. И-1. Использует теоретические знания о закономерностях и особенностях геологических процессов	Знать: факторы, определяющие структурно-текстурные особенности магматических, метаморфических и метасоматических пород, их отличительные признаки; Уметь: интерпретировать результаты анализа структурно-

профессиональной деятельности (формируется частично).	для решения профессиональных задач.	текстурных параметров пород и делать содержательные выводы петрогенетической направленности; Владеть: методами оценки гранулометрических характеристик пород с использованием микроскопических методов измерения.
ОПК-3.Б Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности в соответствии с профилем подготовки (формируется частично)	Б.ОПК-3. И-1. Использует типовые подходы и методы при решении задач профессиональной деятельности.	Знать: основные понятия, подходы и методы структурной петрологии, области их приложения и типовые задачи, решаемые с их использованием; принципы интерпретации результатов микроструктурного анализа с целью реконструкции условий петрогенезиса;
	Б.ОПК-3. И-2. Владеет базовыми навыками получения информации (полевой, камеральной, лабораторной) для решения стандартных задач профессиональной деятельности в соответствии с профилем подготовки.	Уметь: выбирать адекватные поставленной задаче методы структурно-петрологических исследований, измерять и оценивать количественные параметры структуры и текстуры горных пород
	Б.ОПК-3. И-3. Владеет базовыми навыками обработки и интерпретации информации при решении стандартных задач профессиональной деятельности в соответствии с профилем подготовки.	Владеть: приемами измерения пространственных ориентировок решеток с использованием универсального федоровского столика (УФС), способами обработки данных об ориентировках и разориентациях зерен в породе, полученных с использованием СЭМ методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ).

4. Формат обучения – практические занятия, не предполагает электронного обучения и использования дистанционных образовательных технологий (за исключением форс-мажорных обстоятельств – пандемии и т.п.)

5. Объем дисциплины (модуля): 3 зачетных единицы, **108** академических часов, в том числе **26** академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (практические занятия) и **82** академических часа на самостоятельную работу обучающихся.

Форма промежуточной аттестации – зачет

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы (виды самостоятельной работы – эссе, реферат, контрольная работа и пр. – указываются при необходимости)
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, часы				
		Занятия лекционного типа	Занятия практического типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Введение: история развития методов структурной петрологии, её технического оснащения. Элементы пространственного строения и минеральных агрегатов. Принципы стереологии			1		1	Выбор тем рефератов, подбор и анализ литературы. 2 часа.
Принцип работы, назначение, устройство и поверки УФС, монтаж препарата. Построение Френеля и условия "сохранения темноты". Потенциал и трудоемкость федоровского метода.			2		2	Решение задач. 4 часа.
Параметры размера и формы зерен, их оценка. Возможности измерений в плоских сечениях. Распределения размеров зерен. Скорости нуклеации и роста зерен: теоретические модели.			2		2	Домашнее задание: компьютерная симуляция простейших зернистых агрегатов и их сечений. 6 часов
Основные операции на УФС. Определение ориентировки индикатрисы, измерение			2		2	Домашнее задание: измерение констант и

угла оптических осей. Методы обработки результатов измерений на УФС.						ориентировки цветного минерала (пироксен или амфибол). 6 часов.
Реология расплавов, первично-магматические структуры и текстуры. Метаморфическая эволюция агрегатов в отсутствие стресса. Двугранные углы. Зрелые структуры.			1		1	Подготовка к контрольному опросу. 2 часа.
Исследование двойников плагиоклаза на УФС. Законы двойникования.			2		2	Домашнее задание: полная диагностика сдвойникового неокислого плагиоклаза. 8 часов
Срастания минералов. Механизмы, факторы и петрогенетическое значение двойникования и синтаксии.			2		2	
Срастания минералов. Типы симплектитов, их значение в реконструкции процессов петрогенезиса. Анализ строения симплектитов на УФС.			1		1	Домашнее задание: определение закона срастания в гранитном пегматите. 8 часов.
Макро- и микроскопические элементы текстурны: директивность и неоднородность, способы измерения и описания. Деформация минералов и горных пород. Описание напряженного состояния и деформации, обобщенный закон Гука. Симметрия деформированных объектов.			2		2	Решение задач. Подготовка к контрольному опросу. 4 часа.
Исследования директивных текстур: отбор ориентированных образцов, «структурные» координаты. Обзор используемых минералов и фиксируемых направлений. Анализ ориентировок кварца, слюд и			2		2	Домашнее задание: анализ ориентировок кварца, построение "микроструктурной" диаграммы, проверка на однородность. 8 часов

карбонатов: техника измерений, визуализация и обработка результатов.						
Пластические деформации минералов и возникновение предпочтительных ориентировок. Факторы и признаки деформации. Карты механизмов деформации.			1		1	Подготовка к контрольному опросу. 2 часа.
Микротекстурный анализ ориентировок минералов низшей категории. Техника измерений и обработка результатов.			1		1	Домашнее задание: микроструктурный анализ существенно оливиновой породы. 6 часов.
Анализ разориентаций зерен по данным измерений УФС и ДОО. Описание разориентаций в пространстве Родригеса-Франка. Специальные разориентации.			2		2	Статистический анализ разориентаций в оливиновых породах. 5 часов.
Динамическая перекристаллизация: механизмы и следствия. Процессы восстановления и сохранность динамических структур. Пре-, син- и посткинematические элементы структуры метаморфитов.			1		1	Подготовка к контрольному опросу. 2 часа.
Деформация минеральных агрегатов. Метаморфическая дифференциация. Хрупкие деформации. Деформации в сдвиговых зонах.			1		1	
Принципы линейного анализа структуры и текстуры. Оценка частот контактов и удельной поверхности зерен, пространственной неоднородности, модального состава и среднего размера зерен с применением ИСА.			1		1	Домашнее задание: работа с порфировым вулканитом. 6 часов.

Реконструкция метаморфических событий. Тактика и стратегия структурно-петрологических исследований.			1		1	Подготовка к защите реферата. 4 часа
Актуальные проблемы и примеры приложений методов структурной петрологии: доклады (презентации) студентов.			1		1	3 часа
Промежуточная аттестация <i>зачет</i>						6
Итого	108			26		82

Содержание разделов дисциплины:

Теоретическая часть

Введение. Предмет структурной петрологии (СП) – структурные и текстурные характеристики эндогенных горных пород. *Цель* – установление факторов и механизмов формирования и преобразования структур и текстур горных пород в связи с условиями их протекания. *Фактическая основа* СП-исследований добывается путём решения *практических задач* в следующих направлениях: а) анализ микроструктуры (формы, анатомии, размеров и взаимоотношений зерен), б) анализ директивности текстуры - т.н. "микроструктурный анализ" - анализ пространственной ориентировки зерен, в) анализ пространственного распределения зёрен. *Прямая задача теоретических исследований* в СП: построение математических, аналоговых и симуляционных моделей порообразующих процессов, определяющих структуру и текстуру их продуктов. *Обратная задача*, связанная с интерпретацией наблюдений: реконструкция механизмов, условий и последовательности таких процессов. Решению прямой задачи и проверке моделей служит *экспериментальное направление*: получение аналогов природных структур и текстур в контролируемых условиях, воздействие на природные образцы. *Специфические проблемы*: сложность реальных структур, "стирание" ранних структурных и текстурных признаков породы при её преобразовании. Ограничения собственных возможностей СП. Необходимость её *комплексирования* с методами других разделов петрологии и геохимии.

История развития понятийной базы, подходов, методов и концепций СП, уточнение и расширение её предмета и задач: *текстурные особенности пород* – преобладающий предмет исследований в первой половине XX в. (эпоха развития т.н. "микроструктурного анализа"). С середины XX в., благодаря становлению *стереологии*, - рост числа и уровня исследований *структуры пород*. Возможность массового "измерения" статистических параметров структуры и текстуры пород, как продуктов реализации случайных процессов - условие проверки моделей их генезиса. Увеличение роли количественных (инструментальных) методов сбора первичных данных, их автоматизация и компьютеризация.

Техническое оснащение СП исследований. Новейшие методы измерения структурных и текстурных параметров (ДОЭ, рентгеновская томография, Фурье-анализ изображений и др.), их возможности и ограничения. Роль традиционных подходов с использованием поляризационного микроскопа и устанавливаемых на нём устройств (УФС, ИСА и др.), пути повышения их производительности.

Элементы пространственного строения горных пород. Решение основной практической задачи СП - измерение параметров структуры и текстуры, как приложение к минеральным агрегатам методов *стереологии*, главная её задача: статистическое оценивание измеримых параметров различных элементов пространственного строения трёхмерных объектов (агрегатов) в плоских сечениях. Выделяются *нуль-, одно-, двух- и трёхмерные элементы пространственного строения* агрегатов, идеализированные типы последних - а) *полиэдрический* и б) *матричный (дисперсный)*. Простейшие модели этих типов: разбиение Вороного точечных множеств и случайное размещение изолированных тел в пространстве. *Метрические и комбинаторно-топологические черты* этих типов, их проявления в плоских сечениях. Примеры структур пород с реализацией одного из двух или обоих типов, особенности их стереологического анализа, учёт полиминеральности. Основа методов количественной оценки параметров агрегатов - *принцип Кавальери-Акера*. Методы оценки абсолютных (в единице объёма агрегата) и относительных объёмов фаз (модальный состав), площадей межзёренных поверхностей, протяжённости линейных элементов, числа зёрен и др. Главная проблема стереологии - оценка наиболее информативных параметров структуры - *формы и распределения размеров зерен*, отсутствие точного решения в общем виде, приближённые оценки. Специфика приложений методов стереологии в СП - прозрачность и ненулевая толщина шлифов, их учёт и введение поправок. Особенности анатомии зёрен в породах, их петрогенетическое значение.

Параметры размера и формы зерен (в сечениях непосредственно не измеримые, но подлежащие оцениванию). *Метрические характеристики* индивидуального зерна - *объем и площадь поверхности*. Параметры *линейных размеров* зерна: диаметр; эквивалентный диаметр; средний поперечник и др. Статистические их характеристики в агрегате зёрен: среднее, дисперсия, мода, медиана, высшие моменты. *Форма индивидуального зерна*: безразмерные её параметры, в которых отражены анизотричность, невыпуклость, "угловатость" и т.п.: отношение наибольшего и наименьшего поперечников; коэффициент вариации поперечника; отношение квадрата объёма к кубу площади и др. Параметры размеров и формы в *случайных плоских* сечениях зерна (выпуклого) - площадь и периметр, линейные - диаметр, эквивалентный диаметр, диаметр Фере и др. Особенности плоских сечений невыпуклых зёрен. Связь параметров плоских сечений зерна с его трёхмерными параметрами. *Случайная прямая*, секущая зерно, даёт хорду с единственным параметром - длиной. Связь длин хорд с формой и площадью плоского сечения зерна, с его формой, объёмом и площадью поверхности. Параметры их сечений, и вероятность пересечения зёрен случайной плоскостью или прямой, при вариации размера и (или) формы зёрен в агрегате: *обобщённое интегральное уравнение* связи вероятностных параметров трехмерного распределения размеров зёрен и их аналогов более низких размерностей (сечений). Вариативность формы - источник проблем в оценке параметров зёрен в агрегате.

Принципы *оценки метрических параметров* зёрен в агрегате при условии статистической *устойчивости их формы*, роль компьютерного моделирования методом Монте-Карло в установлении параметров формы зёрен, их плоских и линейных сечений. Приёмы выявления границ зёрен и обострения контраста в микроскопических изображениях, для применения сканирующих устройств, программ анализа оцифрованных изображений и т.п. Методы рентгеновской томографии - их возможности и ограничения. Общий подход к решению задачи оценки параметров распределения размеров зёрен в агрегатах - метод Шварца-Салтыкова при анализе распределения размеров пузырей, миндалин и т.п. Необходимость оценки формы зёрен в остальных случаях. Статистическое оценивание *пространственного размещения зёрен*, связь с ним параметров формы и размеров зёрен. *Структура и текстура* - формально различимые, но тесно коррелированные аспекты пространственного строения пород, характер их связи.

Эмпирические распределения размеров зерен, изображение их стандартными гистограммами частот и кумулятивными гистограммами. Использование линейной и логарифмической шкалы размеров. Оценка параметров распределений (моментов) и их аппроксимация логнормальным или обобщённым гамма-распределениями. Преобразования распределений размеров зёрен для сравнения с предсказаниями теоретических моделей.

Скорости нуклеации и роста кристаллов, зависящие от температуры и др. факторов, и определяющие размерные параметры структуры горных пород. Теоретические модели зависящей от времени и переохлаждения гомогенной и гетерогенной нуклеации - варианты уравнений Зельдовича и Фоккера-Планка. Пуассоновское поле точек - эталонная модель гомогенной нуклеации. Модели зависящих от времени и температуры скоростей диффузионно- и поверхностно-лимитированного роста кристаллов. Уравнение Авраами - общая модель нуклеации и роста кристаллов. Параметры массовой кристаллизации. Простейшие и приближённые к реальности теоретические модели формирования зерен и их гранулометрических распределений (Мейеринга, Мэла и Джонсона, Кретца и др.). Специфические особенности влияния процессов нуклеации и роста кристаллов на распределение их по размерам в магматических и метаморфических породах. Равновесная и неравновесная кристаллизация расплавов: особенности формы, анатомии и разграничения индивидов минералов. Характер анатомии, границ и контактов зёрен: критерии очерёдности кристаллизации минералов на магматическом и постмагматическом этапах.

Реология расплавов и первично-магматические структуры и текстуры. Предельное содержание твёрдой фазы, допускающее течение расплава - критерий Арзи. Явления отсадки (уравнение Стокса) и ориентировки кристаллов в покоящемся и текущем расплаве,

их влияние на распределение зёрен по размерам, их форму и текстуру (трахитоидность, флюидальность, разориентации) в магматических породах. Структурно-текстурные особенности кумулятивных образований.

Метаморфическая эволюция минеральных агрегатов в отсутствие стресса (вызревание): редукция границ и рост Оствальда, собирательная перекристаллизация. Поверхностная энергия зерен минералов (аналогия с поверхностным натяжением), её влияние на устойчивость межзёренных границ (двухгранные углы и кривизна границ зерен). Эффективная поверхностная анизотропия различных минералов. Границы встречи и границы приспособления. Лапласово давление и нестабильность малых зёрен. Неустойчивые и устойчивые структуры моно- и полиминеральных агрегатов. Структурно-текстурные параметры "зрелых" минеральных агрегатов: аналогия с полиэдрической пеной. Особенности бластеза при метаморфических и метасоматических реакциях, идиобластический ряд Бекке. Постмагматические изменения структуры и текстуры в магматических породах.

Срастания минералов в горных породах. Незакономерные и закономерные моно- и полиминеральные срастания. *Двойники:* систематика, морфология и диагностика двойников. Нормальные, параллельные и сложные законы двойникования. Феноменологическая триадная теория двойникования. Описание двойникования посредством сдвига и перетасовки атомов. Механизмы образования и отличительные признаки вынужденно деформационных двойников в сравнении с первичными (ростовыми) двойниками. Двойники роста и зарождения: эффект Фултона, ошибка присоединения атомов, синнезис, гетерозпитаксия. Трансформационные и автодеформационные двойники. Петрогенетическое значение частот законов двойникования А и С-типов: концепция Гораи-Тернера.

Механизмы образования и типы *симплектитов*. Их индикаторное значение. Критерии определения условий и механизмов роста индивидов и субиндивидов в симплектитах. Строение и генезис кварц-полевошпатовых срастаний. Генезис мирмекитов, пертитов и антипертитов. Особенности структур распада и их эволюция.

Макро- и микроскопические элементы текстуры горных пород. *Пространственная неоднородность и директивность.* Элементарные виды неоднородности (такситовость, полосчатость и т.п.) и директивности (линейность, плоскостность (сланцеватость)).

Ориентировка зёрен в пространстве. Предпочтительные ориентировки границ и решеток зерен. Обзор способов измерения директивности зёрен - их границ и кристаллографических элементов, количественного её описания и визуализации результатов. Эталон случайной ориентировки единичного направления - пуассоновское поле точек на сфере. Симметрия минералов и число параметров ориентировки зёрен, описание вероятностей распределения характеристических направлений минералов. Описание ориентаций и разориентаций зерен с использованием традиционных и Нео-Эйлеровских способов параметризации вращений (праметризации Родригеса-Франка, изохорическая и др.). Технические средства измерения ориентировки зёрен: УФС, рентгеновские дифрактометры, СЭМ в режиме ДОЭ и др. Макроскопическая директивность, типы "тектонитов".

Распределение зёрен в пространстве. Параметры однородности-неоднородности распределения зёрен и фаз. Автокорреляционные функции как мера неоднородности распределения фаз. Распределения относительных поверхностей зерен в полиминеральном агрегате, частоты "подобных" и "неподобных" контактов, как критерий пространственного распределения зёрен. Проблемы оценивания пространственного распределения зёрен в плоских и линейных сечениях (методы Вистелиуса, Кретца, Уолгрена). Концепция "идеальных гранитов". Значение компьютерного моделирования агрегатов с пространственно однородными и неоднородными структурами и текстурами.

Генезис ориентированных текстур в твёрдом состоянии. Деформация минералов и горных пород. Аналитическое описание напряженного состояния и деформации: тензоры напряжения, дисторсии и деформации, их разложение. Обобщенный закон Гука.

Однородные и неоднородные деформации: простой и чистый сдвиги. Симметрия однородно деформированных объектов. Упругое, хрупкое и пластическое поведение.

Пластические деформации зёрен минералов и агрегатов (скольжение, сдвиг, двойникование, движение дислокаций и дисклинации, блокирование, вращение субзерен, растворение под давлением, крип), и возникновение предпочтительных ориентировок минералов. Признаки пластических деформаций. Факторы механизмов деформации: стресс, общее давление, скорость, температура, флюидонасыщенность, предыстория. Конкуренция скольжения и двойникования, критерий Фон-Мизеса. Явление "упрочнения" и смена механизмов деформации. Синоптические диаграммы ориентировок и анализ деформации минералов. Нормализованные параметры условий и карты механизмов деформации. Типы «структурных» узоров минералов в связи с числом актов и планами деформаций, несводимость причин всех наблюдаемых ориентировок к деформациям зёрен.

Динамическая перекристаллизация: механизмы и следствия. Термодинамическая устойчивость упругодеформированных кристаллов. Растворение, зарождение и рост кристаллов в условиях стресса. Процессы восстановления (отжиг, регенерация, статическая рекристаллизация, грануляция и полигонализация) и сохранность динамических структур и текстур. Пре-, син- и посткинematические элементы структуры метаморфитов.

Деформация неоднородных минеральных агрегатов: локальные флуктуации стресса и общего давления, как фактор дестабилизации зёрен минералов, их растворения и мелкомасштабного диффузионного перераспределения компонентов. *Метаморфическая дифференциация* и генезис полосчатых, очковых, и др. такситовых текстур. Образование теней давления и жил с параллельным заполнением. *Хрупкие деформации.* Катаклазиты и милониты, псевдотахилиты. Особенности деформации в сдвиговых зонах. Окаймлённые порфиорокlastы, структуры типа «ядро-оболочка», повёрнутые и ретортообразные порфиоробласты. Реконструкция движений и определение компонентов стресса.

Реконструкция постмагматической истории горной породы: выявление признаков первично-магматических или седиментационных структур и текстур, анализ числа и интенсивности метаморфических и динамических событий: основные подходы и нерешённые проблемы. Возможности и ограничения структурно-петрологических исследований.

Тактика и стратегия структурно-петрологических исследований. Собственно СП-исследования и прикладное значение СП-методов в решении общепетрологических, тектонофизических и геодинамических задач. Формулировка задачи и выбор методов СП-исследования горной породы: предварительный качественный анализ сложности структуры. Соотношение технической оснащённости и определение удельного веса СП-исследований в решении комплексной задачи, с учётом возможности привлечения изучения включений, геохронометрии и т.п. Анализ состава минералов, термобарогеохимия, выделение генераций - необходимое условие корректности и эффективности СП-исследований. Получение первичной структурно-петрологической информации, петрологическое обеспечение, обработка, визуализация и содержательная интерпретация данных.

Практическая часть

УФС: устройство и принцип действия, назначение и основные диагностические и структурно-петрологические приложения метода. Монтаж препарата и юстировка УФС. Построение Френеля и условия "сохранения темноты". Основная теорема фёдоровского метода. Диагностический потенциал и трудоемкость метода.

Измерение сферических координат кристаллографических направлений: спайности, граней, рёбер, двухгранных углов. Поиск сохраняющихся темнот на УФС, условия сходимости процедуры. Определение *ориентировки осей индикатрисы*, измерение *угла оптических осей*. Запись результатов. Графические методы обработки результатов измерений на УФС. Выбор сегментов, поправки и петрологический контроль измерений.

Диагностика плагиоклазов на УФС: главные операции и ведение документации. Исследование двойников: определение типа и вида законов двойникования. Диагностические диаграммы Никитина, Ван-дер-Каадена, Марфунина, Ванде-Киркова.

Анализ строения симплектитов с использованием УФС, возможности и ограничения. Графические и псевдографические сростания; синтаксис, эндотаксия и топотаксия. Особенности кварц-полевошпатовых закономерных сростаний, законы сростания и их диагностика. Примеры анализа строения реакционных симплектитов.

УФС в исследовании директивных структур - т.н. "Микроструктурный анализ". Принципы отбора *ориентированных образцов* и изготовление препаратов для исследования директивных текстур. «Структурные» *координаты* образца, их привязка к географическим координатам. *Анализ ориентировок минералов с одним характеристическим направлением* (кварц, слюды, карбонаты): техника измерений, документация, визуализация и статистическая обработка результатов. *Равноплощадные проекции, статистические тесты* Вистелиуса и Винчелла на наличие *преимущественной ориентировки*.

Анализ *ориентировок минералов низшей категории симметрии* (оливин, пироксены, эпидоты, амфиболы, кордиерит, кианит, полевые шпаты). Техника измерений, документация, компьютерная обработка и визуализация результатов. *Оптимизация процесса измерений*: последовательный анализ и установление достаточного количества замеров. Отнесение результатов анализа директивных текстур к географическим координатам. Анализ ориентации зерен по данным ДОЭ: углы Эйлера, матрица Бунге. *Анализ разориентаций зерен*, практическое использование параметрического пространства Родригеса-Франка. Переход от ориентаций к разориентациям. Петрогенетическая интерпретация разориентаций, индикаторные разориентации зерен в кумулятах. Специальные разориентации, отвечающие низкоэнергетическим когерентным границам зерен. Решетки совпадающих узлов.

Принципы и способы линейного анализа структуры и текстуры. Площадной, линейный и точечный анализ модального состава породы. Преимущества линейных методов, устройства для их осуществления: ИСА, анализаторы цифровых изображений. Оценка частот контактов и удельных площадей зерен, пространственной неоднородности, модального состава и среднего размера зерен линейными методами. Анализ матрицы частот контактов зёрен. Стандартные средства измерения размеров плоских сечений зёрен под микроскопом, метрологический контроль полученных данных.

Рекомендуемые образовательные технологии.

При обучении в ходе практических занятий технике и методам измерения структурных и текстурных параметров на УФС и других приборах предполагается использование **технологии полного усвоения**. Усвоение материала обеспечивается пошаговым выполнением операций, от простых к сложным. Начальные навыки образуются при выполнении элементарных заданий под контролем преподавателя, далее операции усложняются, а навыки и умения накапливаются. Группы операций объединены в блоки, усвоение материала каждого из которых закрепляется выполнением во время консультаций практического домашнего задания, требующего от обучаемых владения всеми операциями и навыками данного и, в значительной степени, предшествующих блоков.

Технология эвристического обучения представляется оптимальным вариантом ознакомления учащихся в краткие сроки с обширным и связанным с различными областями знаний материалом, составляющим теоретическое содержание данной дисциплины. Возможности творческой работы, высказывания гипотез и догадок в ходе практических занятий кроются в намеренном чередовании изложения твердо установленных фактов и положений с вынесением на обсуждение проблемных, не до конца разрешенных вопросов структурной петрологии. Студентам в ходе занятий предстоит получить лишь начальные представления о широком спектре концепций, гипотез и подходов, составляющих в настоящее время арсенал структурной петрологии. Дальнейшая конкретизация и углубление знаний осуществляются студентами в самостоятельно выбранных направлениях, заинтересовавших их в связи с личными предпочтениями, предшествующим опытом научной работы, тематикой курсовых работ или планами будущих исследований. По теме, выбранной из числа предложенных, или рекомендованной преподавателем,

студент проводит всесторонний анализ проблемы, составляет обзор или реферат, публично защищаемый в период зачетной сессии в форме презентации. Дискуссии приветствуются. По итогам обсуждения презентации, при условии выполнения практических заданий на требуемом уровне, проставляется зачет. Таким образом, студенты не только углубляют начальные знания по предмету, но и расширяют сферу осведомленности по теме в целом.

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Текущий контроль усвоения дисциплины осуществляется при сдаче каждым студентом выполненных расчетных и практических работ.

Для текущего контроля студентов в ходе семестра проводятся контрольные опросы.

Примерный перечень вопросов для проведения текущего контроля:

1. Элементы и измеримые параметры пространственного строения минеральных агрегатов, их систематика. Основные задачи стереологии и подходы к их решению.
2. Диаметр, эквивалентный диаметр и поперечник зерен. Параметры анизотричности зерен. Статистика случайных плоских сечений и хорд: оценка формы и распределения размеров зерен.
3. Статистика формы, размеров и размещения зерен в мономинеральных породах, методы их моделирования и количественной оценки. Случайные процессы и поля на линии, плоскости и в пространстве.
4. Построение Френеля и сохранение темнот в минералах с различной симметрией. Определение наименований осей индикатрисы.
5. Нормальные, параллельные и сложные законы двойникования.
6. Когерентные границы зерен. Решетки совпадающих узлов.
7. Аналитическое описание деформации: течение и мгновенные скорости, тензор дисторсии и тензор деформации. Конечные деформации.
8. Системы скольжения в кристаллах, на примере оливина.
9. Методика измерения предпочтительных ориентировок минералов с одним характеристическим направлением: кварц, слюды, хлориты.
10. Методика обработки результатов "микроструктурного" анализа минералов с одним характеристическим направлением. Переход к равноплощадной проекции. Статистические тесты на директивность ориентировки.
11. Техника измерения пространственной ориентировки минералов низшей категории симметрии. Статистическая обработка и интерпретация результатов.
12. Обратные полюсные фигуры в текстурном анализе.
13. Анализ разориентаций зерен, использование параметризации Родригеса-Франка. Случайные разориентации и статистическое выявление специальных разориентаций.
14. Способы оценки частот контактов зерен. Оценка средней секущей, удельных поверхностей и частот контактов с использованием ИСА.

Домашние задания для самостоятельной подготовки студентов:

- самостоятельные измерения параметров ориентировки зерен и двугранных углов в тройных сочленениях зерен с использованием УФС;
- самостоятельные измерения частот подобных и неподобных контактов и суммарных длин хорд в шлифах с использованием ИСА, оценка модального состава пород;
- обработка данных измерения ориентаций зерен и переход к параметрам разориентаций с использованием программного обеспечения, визуализация результатов.

Расчетные домашние задания:

1. Переход от распределения диаметров, площадей или иных параметров плоских

- сечений зерен к оценке параметров истинного распределения их размеров и формы.
2. Определение положений погасания зерна в зависимости от сферических координат оптических осей. С использованием сетки Вульфа.
 3. Расчет параметров разориентаций зерен с использованием матриц вращений и векторов Родригеса, по данным ДОЭ.
 4. Разложение тензора дисторсии на тензоры деформации и вращения, выделение девиаторного и изотропного компонентов тензора.
 5. Анализ структуры стохастической матрицы, описывающей частоты контактов зерен и относительные площади межзеренных поверхностей. Отклонения распределения зерен от случайного.
 6. Определение числа зёрен на единице площади плоского сечения полиэдрического агрегата. Оценка удельной поверхности границ и протяженности линейных элементов структуры.
 7. Оценка вероятностей полигональных пересечений полиэдрического зерна данной формы и размера случайной плоскостью.
 8. Оценка средней длины хорды при пересечении полиэдрического зерна данной формы и размера случайной прямой, оценка вероятности пересечения.
 9. Предсказание разориентаций, отвечающих наиболее низкоэнергетическим границам зерен, на основе использования решетки совпадающих узлов.
 10. Описание механического двойникования посредством сдвига и перетасовки атомов.

Рекомендуемые темы докладов, рефератов:

1. Петроструктурный анализ в решении проблемы генезиса мигматитов (или каких-либо других конвергентных полигенных образований: чарнокитоидов, серых гнейсов, пегматитов и пегматоидов, карбонатитов).
2. Инструментальное измерение и оценка параметров распределения размеров зерен в моно- и полиминеральных породах. Значение компьютерного моделирования.
3. Зависимость морфологии зерен породообразующих минералов (на выбор: полевые шпаты, оливины, пироксены, кварц) от степени переохлаждения расплавов: влияние этого фактора на структуру породы.
4. Мафические фенокристы в лампрофирах – возможные механизмы возникновения.
5. Равновесная форма зерен в моно- и полиминеральных породах.
6. Компьютерное моделирование и комбинаторно-топологический анализ зернистых агрегатов и их плоских сечений.
7. Отличительные признаки и методы распознавания фенокристов, порфиробластов и порфирокластов.
8. Механизмы образования и различия в характере зональности породообразующих минералов, кристаллизовавшихся из расплава, в ходе бластеза, и в релитах.
9. Признаки и критерии последовательности кристаллизации минералов из расплава и на постмагматическом этапе.
10. Структурные и текстурные критерии анатексиса. Анализ структур и текстур «ультраметаморфитов».
11. Графические и псевдографические симплектиты: способы образования и преобразования, индикаторное значение.
12. Проблема определения частот контактов и удельных поверхностей зерен в связи с их формой, распределением по размерам и характером межзеренных границ.
13. Анализ линейных последовательностей зерен и концепция "идеальных гранитов": нерешённые проблемы и альтернативные подходы.
14. Конкуренция механизмов деформации и регенерации зерен, возможности реконструкции тектоно-метаморфических событий.

15. Признаки пластических деформаций и динамической перекристаллизации в породообразующих минералах. На примере кварца (оливина, амфиболов, пироксенов).
16. Проблема реальных скоростей деформации и прикладное значение карт механизмов деформации.
17. Структуры типа «ядро-оболочка», их генезис и индикаторное значение.
18. Пертиты распада и замещения: механизмы и условия образования, критерии распознавания, индикаторное значение.
19. Моделирование эмпирических микроструктурных узоров как суперпозиции простейших распределений на сфере: прямая и обратная задачи.
20. Использование кватернионов, векторов Родригеса и других форм параметризации вращений при аналитическом описании ориентировки и разориентации кристаллов в пространстве.
21. Декомпозиция комбинированных микроструктурных узоров при реконструкции многоэтапных деформаций. На примере амфиболов.
22. Деформационное двойникование: способы описания и механизмы реализации.
23. Двойники роста и зарождения – есть ли альтернатива автодеформационному механизму?
24. Статистика законов двойникования плагиоклазов как индикатор условий петрогенезиса – ревизия оснований метода и анализ контрпримеров.
25. Роль дислокаций и дисклинаций в механизмах деформации кристаллов породообразующих минералов. Возможности их выявления и интерпретации.
26. Распознавание кумулятивных, реститогенных и перекристаллизованных ультрабазитов по структурным и текстурным особенностям.
27. Петроструктурный анализ офиолитовых комплексов.
28. Структурная петрология и генезис гранито-гнейсовых куполов.
29. Орбикулярные структуры (или структуры типа рапакиви), гипотезы происхождения.
30. Синнезис – реальное явление, или фикция?
31. Триадная теория двойникования – от феноменологии к реконструкции механизмов и условий кристаллизации.
32. Формирование директивных текстур течения и отсадки в магматических породах.
33. Двугранные углы межзеренных границ в равновесных структурах.
34. Признаки вращения зерен при деформациях и их использование в реконструкции тектоно-метаморфических событий.

7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации:

1. Структура и текстура – различимые аспекты пространственного строения горной породы. Факторы и процессы, определяющие формирование и эволюцию структур и текстур. История структурно-петрологических исследований.
2. Скорости нуклеации и роста кристаллов, их влияние на ход затвердевания и итоговую структуру магматической породы. Простейшие математические модели.
3. Условия массовой кристаллизации, её стадии и распределение размеров зерен. Вероятностные характеристики распределения размеров зёрен.
4. Равновесные формы зерен в "структурно зрелых" моно- и полиминеральных породах, их связь с модальным составом и характером бластеза.
5. Поверхностная энергия, форма и границы зерен изотропных и анизотропных минералов в метаморфитах, типы контактов и величины двугранных углов.
6. Отклонения зёрен от полиэдрической формы, характер их границ и относительный идиоморфизм. Критерии последовательности кристаллизации минералов из расплава.
7. Неравновесная кристаллизация многокомпонентных расплавов, неполнота

- протекания реакций и их влияние на особенности структуры магматических пород: реакционные каймы, зональность, реликтовые элементы структур.
8. Переохлаждение расплава и морфология кристаллов породобразующих минералов. Устойчивость плоского фронта роста и целлюлярные (скелетные) формы, сферолиты. Критерий Джексона и нормальный рост кристаллов.
 9. Реология расплава и формирование предпочтительных ориентировок в магматических породах. Критерий Арзи. Особенности структур и текстур кумулятов, индикаторные разориентации зерен в кумулятах.
 10. Зарождение, рост и перекристаллизация метакристаллов. Статические процессы формирования равновесных структур метаморфитов.
 11. Типы межзеренных границ, двугранные углы и тройные стыки в равновесных структурах. Низкоэнергетические границы и решетки совпадающих узлов.
 12. Качественные критерии отличия структур магматических пород от метаморфических. Случаи конвергенции. Реликтовые структуры и текстуры в метаморфитах.
 13. Однородные деформации, способы описания и симметрия их продуктов. Примеры неоднородной деформации.
 14. Напряженное состояние: тензор напряжений, обобщенный закон Гука. Скальвающие напряжения. Модули Юнга и сдвига.
 15. Упругие, хрупкие и пластические деформации в кристаллах и породах. Их отличительные признаки.
 16. Механизмы формирования предпочтительных ориентировок минералов: деформация и динамическая перекристаллизация.
 17. Механизмы пластической деформации. Критерий Мизеса. Наблюдаемые признаки пластической деформации. Полосы сброса.
 18. Факторы пластического поведения кристаллов и минеральных агрегатов. Нормализованные параметры условий деформации. Принципы составления и интерпретации карт механизмов деформации.
 19. Метаморфическая дифференциация и генезис полосчатости.
 20. Механизмы деформации кварца и оливина в зависимости от условий их протекания. Признаки деформации зерен кварца и оливина.
 21. Плоскостность и линейность текстур горных пород, механизмы их возникновения. Виды тектонитов. Структурные координаты, отбор ориентированных образцов и изготовление ориентированных шлифов. Привязка к географическим координатам.
 22. Столик Федорова: устройство, принцип действия, основные операции, достижимая точность и введение поправок. Экспрессное определение осности минерала.
 23. Элементарные текстурные узоры и их композиции. Декомпозиция текстурных узоров и способы выделения этапов деформации.
 24. Синоптические диаграммы предпочтительных ориентировок и определение систем скольжения (на примере кварца и оливина).
 25. Двойники плагиоклаза и калишпата. Триадная теория двойникования.
 26. Отличительные признаки вынужденно деформационных двойников в сравнении с первичными (ростовыми) двойниками.
 27. Двойники роста и зарождения: эффект Фултона, ошибка присоединения атомов, синнезис, гетероэпитаксия. Трансформационные и автодеформационные двойники.
 28. Петрогенетическое значение распределения законов двойникования: концепция Гораи-Тернера.
 29. Петрогенетическое значение трансформационных двойников.
 30. Механизмы образования и типы симплектитов. Их диагностика и индикаторное значение. Закономерности строения кварц-полевошпатовых сростаний.
 31. Выделение структурно-метаморфических парагенезисов. Пре-, син- и посткинematические элементы структуры и текстуры. Конкуренция процессов деформации и регенерации в ходе тектоно-метаморфической эволюции пород.

32. Хрупкие деформации. Структуры катаклазитов. Диагностические признаки порфирокластов. Окаймленные порфирокласты. Деформации в сдвиговых зонах и их окрестностях.
33. Частоты контактов и удельные поверхности зёрен: марковские модели описания линейных последовательностей зерен.

Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине.

Оценка результатов обучения, <i>соответствующие виды оценочных средств</i>	Незачет	Зачет
Знания основных понятий, подходов и методов структурной петрологии, факторов, определяющих структурно-текстурные особенности магматических, метаморфических и метасоматических пород,	Знания отсутствуют или весьма фрагментарны	Знания систематические, но возможна их недостаточная структурированность или наличие небольших пробелов
Умения измерять количественные параметры структуры и текстуры горных пород, интерпретировать результаты анализа структурно-текстурных параметров пород	Отсутствие умений или весьма несистематическое умение	В целом успешное умение измерять количественные параметры структуры и текстуры горных пород и интерпретировать результаты, но с возможными отдельными пробелами непринципиального характера
Владение навыками измерения пространственных ориентировок решеток с использованием универсального федоровского столика и оценки гранулометрических характеристик пород с использованием микроскопических методов измерения	Отсутствие навыков измерений при помощи федоровского столика или наличие только отдельных навыков	Сформированные навыки измерения пространственных ориентировок решеток с использованием универсального федоровского столика и оценки гранулометрических характеристик пород, но возможно их использование не в активной форме

8. Ресурсное обеспечение:

А) Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

1. Гульбин Ю. Л. Методы количественного анализа и моделирование структур минеральных агрегатов. СПб.: Изд-во СПбГГУ, 2004. 146 с.
2. Саранчина Г М., Кожевников В. Н. Федоровский метод (определение минералов, микроструктурный анализ). Л.: Недра, 1985. 208 с.
3. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
4. Шарфман В. С., Кузнецов И. Е., Соболев Р. Н. Структуры магматических пород и их генезис. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. 396 с.

5. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении. Под ред. А. Шварца и др. М.: Техносфера, 2014. -544 с.

дополнительная литература:

1. Бакуменко И. Т. Закономерные кварц-полевошпатовые срастания в пегматитах и их генезис. М.: Наука, 1967. 172 с.
2. Вернон Р. Х. Метаморфические процессы: Реакции и развитие микроструктуры. М.: Недра, 1980. 227 с.
3. Добржинская Л. Ф. Деформации магматических пород в условиях глубинного тектогенеза. М.: Наука, 1989. 288 с.
4. Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 276 с.
5. Золотухин В. В. Основы микроструктурного анализа изверженных горных пород. Новосибирск: Изд-во ИГГ СО АН СССР, 1983. 47 с.
6. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности. М.: Наука, 1972. 192 с.
7. Козлова О. Г., Орлова А. О., Фельдман В. И. Генетическая классификация двойников плагиоклазов // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. Геология, 1984, №1. Сс. 45-52.
8. Пунин Ю. О., Штукенберг А. Г. Автодеформационные дефекты в кристаллах. СПб.: Изд-во С.-Петербур. Ун-та, 2008. 318 с.
9. Сосин Д. Т., Иванов М. А., Глазов А. И. Закономерные сростки плагиоклаза с кварцем в пегматитах // Зап. ВМО, 1990, ч. 119, вып. 2, сс. 40-46.
10. Higgins M. D. Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology. Cambridge: University press. 2006. – 265 p.

Б) Перечень программного обеспечения: Microsoft Office PowerPoint

В) Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

Г) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»:
Геологическая энциклопедия GeoWiki - <http://wiki.web.ru>.

Д) Материально-техническое обеспечение:

- а) помещение – аудитория, рассчитанная на группу из 10 учащихся;
 - б) оборудование – поляризационные микроскопы МИН-8 или МИН-10, Универсальные Федоровские столики; Интеграционные столики Андина; персональные компьютеры;
 - в) иные материалы – коллекция петрографических шлифов горных пород и минералов,
- 9. Язык преподавания** – русский.

10. Преподаватель (преподаватели) – Шкурский Б.Б.

11. Разработчик программы – доц. Шкурский Б.Б.