

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

УТВЕРЖДАЮ

**Декан Геологического факультета
академик**

_____/Д.Ю.Пушаровский/

« ____ » _____ 20 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Петрология мантии: структура и состав

Автор-составитель: Сафонов О.Г.

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

05.04.01 Геология

Направленность (профиль) ОПОП:

Петрология

Форма обучения:

Очная

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

Москва 2019

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, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки*) в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 г № 1674.

Год (годы) приема на обучение – 2019.

© 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

Цель – приобретение знаний о строении и составе мантии Земли, свойствах и фазовых соотношениях минералов, флюидов и расплавов при высоких давлениях и температурах, сопряженном протекании флюидно-магматических и метасоматических процессов в мантии и связи этих процессов с генерацией различных по составу магм;

Задачи: раскрытие тектонических, минералогических и геохимических причин неоднородности мантии Земли по глубине и латерали, освоение задач и методов моделирования фазовых превращений в породах мантии при высоких температурах и давлениях и связи этих превращений с процессами магматизма и мантийного метасоматоза.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО – вариативная часть, профессиональный блок, обязательные дисциплины, курс – I, семестр – 2.

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

освоение дисциплин «Общая геология», «Петрология магматических пород», «Основы физической геохимии», «Термодинамика минералов», «Минеральные равновесия», «Теория фазового соответствия», «Минералогия», «Кристаллохимия».

3. Результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников, формируемые (частично) при реализации дисциплины:

ОПК-4.М Способность применять на практике знания фундаментальных и прикладных разделов дисциплин, определяющих профиль подготовки

СПК-4.М Способность использовать различные типы петрологических и петрохимических диаграмм для решения научных и практических петрологических задач.

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):

Знать: фазовые соотношения минералов, флюидов и расплавов, магматические, метаморфические и метасоматические процессы в мантии Земли на различных ее глубинах.

Уметь: проводить экспертную оценку минеральных ассоциаций и процессов в мантии Земли; рассчитывать термодинамические свойства минералов при высоких давлениях; анализировать диаграммы фазовых соотношений минералов, флюидов и расплавов; разбираться в моделях строения и состава мантии Земли.

Владеть: принципами построения фазовых диаграмм, навыками диагностики минералов перидотитовых и эклогитовых парагенезисов мантии, программными комплексами для расчета условий формирования минеральных парагенезисов и частичного плавления пород в условиях мантии.

4. Формат обучения – лекционные и семинарские занятия

5. Объем дисциплины (модуля) составляет 4 з.е., 144 академических часа, в том числе 26 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (13 часов – занятия лекционного типа, 13 часов – занятия семинарского типа), 118 академических часов на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации – экзамен.

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

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Дисциплина «Петрология мантии: структура и состав» направлена на приобретение знаний о строении, химическом и минеральном составе мантии Земли, причинах латеральной и вертикальной неоднородности мантии, сопряженных процессах флюидно-магматического взаимодействия, магмогенерации и метасоматоза в мантии. В курсе рассматриваются экспериментальные данные по стабильности минералов и их ассоциаций, фазовым соотношениям и плавлению перидотитов и эклогитов с участием флюидов различного состава, свойствам флюидов и расплавов в мантии Земли. На основе этих сведений рассматриваются проблемы генезиса базальтов, коматиитов, кимберлитов, лампроитов, карбонатитов, щелочных пород. Формами контроля знаний магистрантов являются проверочные и контрольные работы, в конце каждого семестра предусмотрен экзамен. Формами самостоятельной работы магистрантов являются короткие (15-20 мин.) презентации по разнообразным темам, относящимся к петрологии мантии Земли.

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 лабораторного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Раздел 1. Строение мантии и природа ее границ.		1	–	1	2	8
Раздел 2. Состав мантии Земли. Температуры и давления в мантии Земли		2	–	2	4	16
Раздел 3. Методы экспериментального изучения фазовых отношений в мантийных ассоциациях		1		1	2	7
Раздел 4. Главные минералы мантии Земли.		5		5	10	43
Раздел 5. Минералы мантии Земли, содержащие летучие компоненты.		4		4	8	34
Промежуточная аттестация <i>экзамен</i>						10
Итого	144			26		118

Содержание разделов дисциплины:

1. Строение мантии и природа ее границ.

Обсуждаются общие характеристики мантии Земли и ее положение в общей структуре планеты. Рассматривается строение мантии и природа ее границ. Обсуждаются изохимические и неизохимические модели границы Мохоровичича. Приводятся сведения о границе Гутенберга и слоя D''. Рассматриваются общие сведения о глобальных и неглобальных сейсмических разделах в мантии.

2. Состав мантии Земли. Температуры и давления в мантии Земли

Рассматриваются основные методы оценки состава мантии Земли: прямые наблюдения ассоциаций мантии, геохимические, космохимические и геофизические оценки. Приводится характеристика главных минеральных ассоциаций мантийных пород. Обсуждаются фации глубинности перидотитов. Рассматриваются методы оценки градиентов температуры и давления в мантии Земли (геотермический метод, сейсмический метод, петрологический метод). Обсуждаются физико-химические модели строения мантии Земли.

3. Методы экспериментального изучения фазовых отношений в мантийных ассоциациях

Обсуждаются основные экспериментальные методы изучения фазовых равновесий при высоких температурах и давлениях. Рассматриваются конструкционные особенности аппаратов цилиндр-поршень, наковален Бриджмена, многопуансонных аппаратов, аппаратов с алмазными наковальнями.

4. Главные минералы мантии Земли

Рассматриваются особенности структуры, состава и фазовых соотношений между фазами в системе $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$ при высоких давлениях. Обсуждается связь полиморфизма в этой системе с глобальными геофизическими границами мантии Земли. Вводится понятие о растворимости воды в номинально безводных минералах мантии. Рассматриваются экспериментальные данные по влиянию температуры, состава и флюидного режима на положение границ оливин-вадслеит, вадслеит-рингвудит, рингвудит-перовскит-периклаз. Приводятся петрологические и геофизические данные о вариации глубины и мощности указанных границ в мантии в соответствии с закономерностями в вариациях положения вышеуказанных фазовых границ. Рассматриваются особенности структуры, состава и фазовых соотношений между фазами в системе $Mg_2Si_2O_6-Fe_2Si_2O_6$ при высоких давлениях. Обсуждается растворимость Al_2O_3 и CaO , а также воды, в ортопироксенах как показатели P-T условий эволюции верхнемантийных перидотитов. Обсуждается связь полиморфизма в системе $Mg_2Si_2O_6-Fe_2Si_2O_6$ с некоторыми геофизическими границами мантии Земли (например, раздел X, раздвоение границы 670-700 км. в зонах субдукции). Рассматривается растворимость воды в полиморфах $Mg_2Si_2O_6$ и связь ее с бюджетами верхней и нижней мантии по воде. Обсуждается роль Al и Fe^{3+} в силикатном перовските в задании окислительно-восстановительных условий в нижней мантии. Рассматриваются особенности структуры, состава и фазовых соотношений между фазами в системе $CaMgSi_2O_6-CaFeSi_2O_6$ при высоких давлениях. Обсуждаются вариации Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Na_2O , K_2O , а также воды, в клинопироксенах как показатели P-T условий эволюции верхнемантийных перидотитов. Обсуждается роль появления $CaSiO_3$ -перовскита за счет распада Ca-пироксена с некоторыми геофизическими границами мантии Земли (например, раздвоение границы 500-520 км.). Обсуждаются проблемы классификации гранатов мантийных парагенезисов. Рассматриваются фазовые соотношения в гранатовых системах при высоких давлениях. Обсуждаются вариации содержаний SiO_2 , Cr_2O_3 , Na_2O , TiO_2 ,

P_2O_5 , а также воды, в гранатах как показатели P-T условий эволюции верхнемантийных перидотитов и эклогитов. Рассматриваются закономерности вариации Fe^{3+} в гранатах как показателя окислительно-восстановительных условий в верхней мантии и переходной зоне. Рассматриваются проявления ферропериклаза (магнезиовюстита) в мантийных парагенезисах и возможная связь этих проявлений с ассоциациями нижней мантии. Обсуждаются особенности полиморфизма в системе MgO-FeO, понятие спинового перехода в ферропериклазе, распределение FeO, NiO, Cr_2O_3 между ферропериклазом и рингвудитом, гранатом, перовскитом. Кратко рассматриваются полиморфы SiO_2 и их роль в парагенезисах пород мантии.

5. Минералы мантии Земли, содержащие летучие компоненты

В водной части рассматривается общая схема стабильности водосодержащих фаз в перидотитовых парагенезисах мантии и геохимическая роль. Фазы в системе MgO-SiO₂-H₂O. Серпентин, высокоплотные водные магнезиальные силикаты А, Е, D, G, В (DHMS), особенности их структуры, состава и пределы стабильности. Фаза X. Обсуждается петрологическая роль этих фаз в транспортировке воды и других компонентов в мантию. Дается характеристика амфиболов в парагенезисах пород мантии. Рассматриваются пределы стабильности и особенности состава Ca-Na амфиболов (паргасита и керсутита) в перидотитовом субстрате. Обсуждаются взаимоотношения пределов стабильности амфиболов с солидусами водосодержащих перидотитов в условиях насыщенности и недосыщенности водой, эффекты состава перидотитов на область стабильности амфиболов, вариации состава амфиболов с температурой и давлением. Характеризуется роль амфиболов как концентраторов и переносчиков галогенов в верхней мантии. Дается характеристика флогопитам в парагенезисах пород мантии. Рассматриваются пределы стабильности и особенности состава флогопита в перидотитовом субстрате. Обсуждаются взаимоотношения пределов стабильности флогопита с солидусами водосодержащих перидотитов, вариации состава флогопита с температурой и давлением. Рассматриваются различные флогопит-содержащие парагенезисы в верхней мантии, модели их образования в верхней мантии и связь этих парагенезисов с верхнемантийным метасоматозом. Рассматриваются особенности плавления и стабильности флогопита в системе Mg_2SiO_4 - $KAlSiO_4$ - SiO_2 - (H_2O-CO_2-F) как модели генерации и эволюции ультракалиевых расплавов (камафугитов, лейцититов, лампроитов). Рассматриваются петрологические данные о находках карбонатных фаз во включениях в мегакристаллах, алмазах, нодулях перидотитов и эклогитов, вариации состава карбонатов. Характеризуются пределы стабильности $CaCO_3$, $MgCO_3$ и $CaMg(CO_3)_2$ при высоких и ультравысоких давлениях в связи с проблемой сохранности карбонатов в нижней мантии. Рассматривается система $CaCO_3$ - $MgCO_3$ при высоких давлениях как модель карбонатитовых расплавов в мантии. Обсуждаются главные реакции карбонатизации-декарбонатизации в перидотитах и соотношение этих реакций с солидусами карбонатизированных перидотитов. Обсуждаются модели генерации кимберлитов и проблема первичного кимберлитового расплава. Обсуждаются главные реакции карбонатизации-декарбонатизации в эклогитах и затрагиваются проблемы плавления карбонатизированных эклогитов. Рассматриваются карбонатно-силикатные реакции в условиях переменной фугитивности кислорода в связи с проблемой сохранности алмаза в породах мантии.

Содержание семинаров.

На семинарах обсуждаются указанные выше разделы лекционного курса с привлечением дополнительной литературы.

Рекомендуемые образовательные технологии

Используются образовательные технологии полного усвоения, т.е. учебный процесс строиться так, чтобы подвести всех учащихся к единому, чётко заданному уровню овладения знаниями и умениями. В качестве формы контроля знаний применяются проверочные работы, а также сдача всех работ, предлагавшихся в течение семестра. Важным элементом преподавания дисциплины являются презентации и доклады учащихся с использованием дополнительных материалов (статей, книг, материалов из сети Интернет), совместный разбор ошибок при выполнении проверочных работ. Для решения поставленных задач учащиеся могут использовать компьютерные программы как общего назначения, так и специализированные программные комплексы. Критерием выполнения задания наряду с правильным ответом является также корректность хода решения. Самостоятельная работа предполагает изучение литературы, рекомендуемой преподавателем. При чтении курса лекций используются мультимедийные технологии и методы обучения, основанные, в том числе, на механизме интеракции.

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 работ. Для текущего контроля студентов в ходе семестра проводятся контрольные опросы.

Перечень некоторых вопросов для проведения текущего контроля

1. На рисунке показана схема структуры переходной зоны в некотором ее участке. Из приведенных ниже вариантов выберите тот, который может объяснить уширение (утонение) переходной зоны.
2. На рисунке показаны главные P-T поля стабильности различных фаз и ассоциаций в системе Mg_2SiO_4 . Расставьте на рисунке следующие символы фаз, в соответствующие поля диаграммы: Wad (вадслеит), Fo (форстерит), AnhB (безводная фаза B), L (расплав), Rin (рингвудит), Pv (перовскит), Per (периклаз)
3. Из приведенных ниже утверждений выберите то, которое наиболее точно характеризует переход рингвудит = Mg-перовскит + ферропериклаз.
4. Ниже в таблице приведены элементные анализы некоторых ксенолитов, вынесенных базальтовыми и кимберлитовыми магмами. Используя выводы из работы Jagoutz et al (1979) о взаимоотношениях космохимического и геохимического трендов эволюции вещества с возможным составом примитивной мантии (ПМ) Земли на диаграмме в координатах соотношений Mg/Si и Al/Si, определите (отметьте в соответствующем квадрате), какой из ксенолитов ближе к составу ПМ.
5. Из приведенных ниже положений отметьте те, которые соответствуют модели границы Мохоровичича по А.Е. Рингвуду и Д.Х. Грину (Ringwood & Green, 1964).
6. Из приведенных реакций и фазовых переходов отметьте те, у которых отрицательный энтропийный эффект (ΔS): вадслеит = рингвудит, рингвудит = Mg-перовскит + периклаз, клиноэнстатит = мэйджорит, ортоэнстатит = клиноэнстатит
7. На рисунке показаны композиционные поля гранатов мантийных ассоциаций по классификации Н.В. Соболева. Какие из этих полей соответствуют гранатам

гарцбургитов, верлитов, эклогитов, гросспидитов, лерцолитов. Впишите соответствующие номера рядом с названием породы.

8. Определите глубину (с точностью до целых), соответствующую давлению 6.6 ГПа в мантии, состоящей из гранатового лерцолита (плотность 3.35 г/см³).

9. Из приведенных ниже утверждений выберите то, которое наиболее точно характеризует растворимость Al₂O₃ в ортопироксенах гранатовых перидотитов.

10. Из приведенных ниже утверждений выберите то, которое наиболее точно характеризует поведение Са-На амфибола в недосыщенной H₂O лерцолитовой системе.

11. Из приведенных ниже утверждений выберите то, которое наиболее точно характеризует минералогию и геохимию нодулей MARID.

Расчетные задания:

1. Используя нижеприведенные термодинамические данные, рассчитайте давление, соответствующее переходу форстерит = вадслеит при температуре 300 К, принимая во внимание, что (а) объемный эффект перехода не зависит от давления; (б) объемы фаз линейно зависят от давления: $V = V^0(1 - P/K^0)$; (в) Зависимости объемов фаз подчиняются уравнению Берча-Мурнагана, а интеграл $\int VdP = V^0K^0/3[(1+4P/K^0)^{3/4} - 1]$. Сравните результаты со значением 11.6 ГПа, полученным при экстраполяции экспериментальных данных на 300 К. Какой из результатов ближе к этому значению?

2. Используя термодинамические данные для вадслеита, рингвудита, Mg-перовскита и периклаза, оцените dP/dT наклоны реакций $Wad = Rin$ и $Rin = Pv + Per$. Объясните различия в наклоне этих реакций с точки зрения кристаллохимии.

3. Используя экспериментальные данные по распределению Mg-Fe между сосуществующими гранатом, рингвудитом и вадслеитом (Frost, 2003), а также данные по объемам конечных членов твердых растворов (Akaogi et al., 1989; Holland & Powell, 1998), оцените ΔH и ΔS обменной реакции между рингвудитом и вадслеитом. В расчетах следует принять, что твердый раствор граната близок к идеальному, а растворы рингвудита и вадслеита могут быть описаны регулярной моделью смешения (Akaogi et al., 1989). Оцените, насколько соответствуют вашим расчетам составы сосуществующих рингвудита и вадслеита, приведенные в работе (Frost, 2003).

4. Используя термодинамические данные для пирропа, форстерита, шпинели и энстатита (Holland & Powell, 1998), оцените относительное влияние 20 мол. % кноррингитового (Mg₃Cr₂Si₃O₁₂) или уваровитового (Ca₃Cr₂Si₃O₁₂) компонентов в твердом растворе граната на положение линии реакции $2En + Spl = Prp + Fo$. При решении задачи принять независимость термодинамических эффектов реакции от T и P. Необходимо учесть также отсутствие Cr в энстатите и форстерите, но учесть 60 мол. % пикрохромитового компонента (MgCr₂O₄) в шпинели.

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

1. Главные геофизические границы в мантии Земли и их петрологическая интерпретация. Влияние температуры, флюидного режима и фазового состава на положение и мощность геофизических границ в мантии.

2. Фазовые равновесия в системе MgSiO₃ при высоких давлениях. Относительное положение и P-T наклоны линий реакций в системе MgSiO₃. Влияние воды на положение этих линий.

3. Растворимость воды в «номинально безводных» минералах мантии и ее геофизическое значение.
4. Главные положения пиrolитовой модели мантии. Состав пиrolита и его фазовые ассоциации при различных давлениях. Преимущества и недостатки этой модели.
5. Методы оценки состава примитивной мантии Земли: космохимические оценки, оценки по фрагментам мантийного вещества в изверженных породах. Геохимический и космохимические тренды эволюции вещества и их соотношение с составом примитивной мантии.
6. Фазовые равновесия в системах Mg_2SiO_4 и $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$ при высоких давлениях. Относительное положение и P-T наклоны линий реакций в системе Mg_2SiO_4 . Влияние воды на положение этих равновесий.
7. Экспериментальные методы изучения фазовых равновесий в мантии Земли. Установки, их конструкционные особенности и P-T возможности. Возможности изучения фазовых равновесий при высоких давлениях *in situ*.
8. Температуры и давления в мантии Земли. Геотермический градиент. Методы его оценки.
9. Граница Мохоровичича. Ее геофизическая и петрологическая интерпретация. Эклогитизация океанической коры и ее роль в формировании границы кора-мантия. Фации глубинности перидотитовых ассоциаций.
10. Пиклогитовая модель и модель расслоенной мантии. Интерпретация геофизических границ в мантии с точки зрения этих моделей.
11. Устойчивость карбонатных фаз в мантийных парагенезисах в зависимости от температуры, давления, фугитивности кислорода. Реакции карбонатизации/декарбонатизации в перидотитах и эклогитах.
12. Главные водосодержащие минералы в «пиrolитовой» мантии Земли и их петрологическая и геохимическая роль.

Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине.

Результаты обучения	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания: фазовые соотношения минералов, флюидов и расплавов, магматические, метаморфические и метасоматические процессы в мантии Земли на различных ее глубинах.	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания
Умения: экспертная оценка минеральных	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение,	В целом успешное, но содержащее отдельные	Успешное умение использовать физико-

ассоциаций и процессов в мантии Земли; расчеты термодинамических свойств минералов при высоких давлениях; анализ диаграмм фазовых соотношений минералов, флюидов и расплавов.		допускает неточности непринципиального характера	пробелы умение использовать физико-химические расчеты.	химические расчеты применительно к минеральным ассоциациям мантии Земли.
Владения: принципами построения фазовых диаграмм, навыками диагностики минералов перидотитовых и эклогитовых парагенезисов мантии, программными комплексами для расчета условий формирования минеральных парагенезисов и частичного плавления пород в условиях мантии.	Навыки владения фазовыми диаграммами и методами диагностики минералов отсутствуют	Фрагментарное владение методиками, наличие отдельных навыков	В целом сформированные навыки использования фазовых диаграмм и методов диагностики минералов.	Владение графическими методами, использование их для решения генетических задач петрологии мантии Земли.

8. Ресурсное обеспечение:

Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

А.Е. Рингвуд Состав и петрология мантии Земли Москва: Недра, 1981.

Петрология верхней мантии Земли (Фундаментальные труды зарубежных ученых по геологии, геофизике и геохимии). Сборник статей. Москва: Мир, 1968.

Майсен Б., Беттчер А. Плавление водосодержащей мантии. Москва: Мир, 1979.

- дополнительная литература:

Gasparik T. Phase diagrams for geoscientists. Springer, 2003, 462 p.

Anderson D.L. Theory of the Earth. Blackwell Scientific Publications, 1989, 366 p.

Anderson D.L. The new theory of the Earth. Cambridge University Press, 2007, 400 p.

Advances in high-pressure mineralogy. Ed. E. Ohtani, The Geological Society of America, Special paper 421, 2007.

The mantle and core. Treatise in geochemistry, V. 2, Ed. R.W. Carlson, Elsevier, 2005, 608 p.

Mantle petrology: field observations and high-pressure experimentation. Eds: Boyd F.R., Fei Y., Bertka C.M., Mysen B.O., Geochemical Society Special Publications, V.6, 1999, 322 p.

Mantle xenoliths. Ed: Nixon P.H., Wiley Interscience Publication, 1987, 844 p.

программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Для успешного освоения курса необходимы навыки использования распространенных текстовых и графических редакторов, умение использовать электронные таблицы, программы для подготовки и представления презентаций. Помимо программных комплексов общего назначения в курсе используются программные комплексы TWQ и PERPLE_X для термодинамического моделирования минеральных равновесий. Эти программы и методические указания к нему находятся в сети Интернет (http://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/twq.html, <http://www.perplex.ethz.ch>). Эти программы основаны на взаимосогласованных базах термодинамических данных (Holland, Powell, 2008; Berman, 1988).

Материально-техническое обеспечение:

- персональные компьютеры.

9. Язык преподавания – русский.

10. Преподаватель (преподаватели) – Сафонов О.Г.

11. Автор (авторы) программы – Сафонов О.Г.