

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:
фазовые равновесия, плавление и флюидный режим**

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 2018

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 – 2018.

© 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, дисциплина по выбору, курс – II, семестр – 3.

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 1 з.е., 36 академических часов, в том числе 28 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (8 часов – занятия лекционного типа, 20 часов – занятия семинарского типа), 8 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: фазовые равновесия, плавление и флюидный режим» 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 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. Состав и свойства флюидов в мантии		1	–	4	5	1
Раздел 2. Плавление модельных и природных перидотитовых систем без участия флюидных компонентов и с их участием		2	–	4	6	1
Раздел 3. Плавление модельных и природных эклогитовых и пироксенитовых систем без участия флюидных компонентов и с их участием		2	–	4	6	1
Раздел 4. Термобарометрия мантийных ассоциаций и моделирование фазовых равновесий ассоциаций мантии		2	–	4	6	1
Раздел 5. Проблемы взаимодействия мантия-кора и мантия-ядро		1		4	5	1
Промежуточная аттестация <u>экзамен</u>						3
Итого	36			28		8

Содержание разделов дисциплины:

1. Состав и свойства флюидов в мантии

Рассматриваются особенности состава флюидов в мантийных ассоциациях по данным флюидных включений в минералах мантийных ксенолитов и алмазов. Приводятся методы расчета фугитивности кислорода в мантийных парагенезисах различной глубинности. Обсуждается вертикальная и латеральная неоднородность мантии по окислительно-восстановительному режиму и состав флюидов в системе С-О-Н в зависимости от глубины, геотектонического положения, возраста. Обсуждается парадокс окислительно-восстановительного режима в мантии. Рассматриваются термодинамические модели С-О-Н флюида в мантии Земли. Рассматриваются физико-химические свойства H_2O , CO_2 , CH_4 при высоких давлениях и температурах, свойства систем $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$, $\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4$, $\text{H}_2\text{O}-(\text{K}, \text{Na})\text{Cl}$. Обсуждается растворимость солевых компонентов в надкритических флюидах. Вводится понятие второй критической точки и рассматривается растворимость силикатных компонентов в водных флюидах в условиях мантии. Затрагиваются проблемы подвижности флюидов в мантийном субстрате.

2. Плавление модельных и природных перидотитовых систем без участия флюидных компонентов и с их участием

Рассматриваются фазовые отношения в краевых сечениях модельной перидотитовой системы $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ при различных давлениях без участия летучих компонентов. Обсуждаются вариации составов расплавов вблизи солидуса модельного перидотита в зависимости от температуры и давления, а также влияние дополнительных компонентов на плавление модельных перидотитов. Рассматриваются экспериментальные данные по плавлению природных перидотитов при различных давлениях без участия летучих компонентов. Обсуждаются методы анализа близосолитусных расплавов и зависимости их составов в связи с генезисом базальтовых серий. Обсуждаются зависимости температуры солидусов от состава перидотитовых систем. Рассматриваются экспериментальные данные по плавлению природных перидотитов при различных давлениях с участием водного флюида. Обсуждаются зависимости составов расплавов в интервале давлений до 3 ГПа в связи с генезисом базальтовых и андезитовых серий. Обсуждаются зависимости температуры солидусов от концентрации воды и состава перидотитовых систем. Приводится сравнение процессов плавления перидотитов без участия флюидов и с участием водного флюида. Обсуждаются проблемы генезиса коматиитовых магм. Рассматриваются экспериментальные данные по плавлению природных перидотитов при различных давлениях с участием флюидов $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$, $\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4$, $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2$, $\text{H}_2\text{O}-(\text{K}, \text{Na})\text{Cl}$. Обсуждается механизм редокс плавления в мантии.

3. Плавление модельных и природных эклогитовых и пироксенитовых систем без участия флюидных компонентов и с их участием

Рассматриваются экспериментальные данные по плавлению модельных и природных эклогитов и гранатовых пироксенитов при различных давлениях без участия летучих компонентов. Обсуждаются зависимости составов близосолитусных расплавов в зависимости от давления и состава систем. Проводится сопоставление расплавов, генерирующихся при плавлении эклогитов, с известково-щелочными и щелочными магмами в зонах субдукции. Рассматриваются экспериментальные данные по плавлению модельных и природных эклогитов и гранатовых пироксенитов при различных давлениях с участием водного флюида. Обсуждаются зависимости составов близосолитусных расплавов в зависимости от содержания воды и состава систем. Обсуждается вопрос о

взаимодействии расплавов генерирующихся при плавлении эклогитов, с перидотитами и модель пироксенизации мантии, а также модели образования адакитовых магм.

4. Термобарометрия мантийных ассоциаций и моделирование фазовых равновесий ассоциаций мантии

Обсуждаются различные традиционные методы минералогической термобарометрии в отношении перидотитовых и эклогитовых ассоциаций при условиях мантии Земли. Обсуждаются некоторые дополнительные методики оценок температур и давлений для минеральных ассоциаций мантийных перидотитов и эклогитов. Рассматриваются методики расчета температур на основе распределения микроэлементов между минералами, методики оценки давления на основе содержания Si в шпинелях, мэйджоритовой составляющих в гранатах, K в клинопироксенах и другие методики. Обсуждаются методики расчета давления по ИК спектрам сжатых включений минералов в кристаллах алмаза. Разбирается приложение компьютерного комплекса PERPLE_X к расчету P-T условий и моделированию минеральных ассоциаций пород верхней мантии. Рассматриваются примеры расчета физических свойств пород (плотности, скорости сейсмических волн).

5. Проблемы взаимодействия мантия-кора и мантия-ядро

Приводится краткий обзор данных о флюидно-магматическом взаимодействии мантии с нижней корой под кратонами, взаимодействии мантии с субдуцирующими плитами. Рассматриваются гипотезы о воздействии ядра на породы нижней 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 строится так, чтобы подвести всех учащихся к единому, четко 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

Задачи на определение путей частичного плавления мантийных ассоциаций

1. Используя эту диаграмму плавкости системы $KAlSiO_4$ - Mg_2SiO_4 - SiO_2 - H_2O , запишите схему плавления трех пород, составы которых указаны на диаграмме звездочками: 1. флогопит содержащего гарцбургита, 2. флогопит содержащего ортопироксенита и 3. флогопит содержащего дунита. Какая из ассоциаций при близосолидусном плавлении произведет наиболее недосыщенный SiO_2 расплав?
2. Используя схемы главных реакций в системе CaO - MgO - SiO_2 - CO_2 и ликвидусных полей в этой системе при 2.7 ГПа, опишите последовательность фазовых соотношений и ход изменения состава расплава в доломит содержащем лерцолите при 2.7 ГПа в температурном интервале 1000-1700^oC. Охарактеризуйте, как будет меняться состав расплава в области плавления на этом барическом сечении.
3. Используя диаграммы плавкости в модельной системе форстерит-диопсид-энстатит-пироп при 5 и 10 ГПа составьте схемы частичного плавления гранатового лерцолита и определите, в чем состоит влияние давления на этот процесс.

Задачи на использование программных комплексов TWQ и PERPLE_X для термобарометрии и моделирования минеральных ассоциаций мантии

1. Используя данные по составам сосуществующих минералов в гранатовом (шпинелевом) перидотите, с помощью программы TWQ рассчитайте температуру и давление, соответствующие этой минеральной ассоциации.
2. Используя данные по составам сосуществующих минералов в эклогите, с помощью программы TWQ рассчитайте температуру и давление, соответствующие этой минеральной ассоциации.
3. Используя данные по валовому составу лерцолита KLB-1 (НК-66), моделирующего состав пиrolитовой мантии, с помощью программы PERPLE_X рассчитайте псевдосекцию в интервале давлений 20 – 100 кбар и температур 500 – 1300^oC. Как меняются минеральные ассоциации вдоль среднего геотермического градиента в мантии. Постройте профиль плотности пород и скоростей сейсмических волн.

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

1. Из приведенных ниже утверждений выберите то, которое наиболее точно характеризует влияние дополнительных летучих компонентов, таких как H_2O , F, Cl, на процесс плавления карбонатизированного перидотита при давлениях более 4 ГПа.
2. На рисунке приведена диаграмма плавкости системы $KAlSiO_4$ - Mg_2SiO_4 - SiO_2 - H_2O . Используя эту диаграмму, запишите схему плавления флогопит содержащего ортопироксенита (черная точка).
3. На рисунке приведена диаграмма плавкости системы $KAlSi_2O_6$ - Mg_2SiO_4 - $CaMgSi_2O_6$ - H_2O . Используя эту диаграмму, запишите схему плавления флогопитового клинопироксенита (черный ромб). На схеме плавления напишите интервал температур, при котором начнется плавление этой породы.
4. Из приведенных ниже утверждений выберите то, которое наиболее точно отражает закономерности растворимости CO_2 в основных силикатных расплавах.
5. Используя схему главных реакций и солидуса в CO_2 -содержащем перидотите расположите в соответствующих ячейках следующие минеральные ассоциации и типы магм: (1) – кимберлиты, (2) – магнезитсодержащие лерцолиты, (3) – доломитсодержащие

лерцолиты, (4) – мелилититы, (5) – базальты, (6) – магнезиальные карбонатиты, (7) – кальциевые карбонатиты, (8) – (карбонатсодержащие) верлиты.

6. На приведенной ниже диаграмме показаны фазовые отношения между водой и силикатным компонентом А, растворимость которого в воде возрастает с повышением температуры и давления. В нанесенных на диаграмму кругах поставьте номера, соответствующие следующим точкам, кривым и полям на диаграмме: 1. Тройная точка компонента А, 2. Вторая критическая точка, 3. Первая критическая точка, 4. Критическая точка воды, 5. Критическая точка компонента А, 6. Кривая сухого плавления компонента А, 7. Критическая кривая, 8. Кривая равновесия вода-пар, 9. Кривая водонасыщенного плавления компонента А, 10. Поле сосуществования расплава А + пар, 11. Поле надкритического флюида, 12. Тройная точка воды.

7. В чем состоит «редокс парадокс» в мантии Земли?

8. На основе диаграммы плавкости системы CMAS покажите ход плавления гранатового лерцолита.

По итогам обучения проводится экзамен. Ниже приведен перечень некоторых вопросов при проведении экзамена.

1. Плавление водосодержащих перидотитов. Роль амфиболов и флогопита при плавлении перидотитового вещества мантии.

2. Флогопит содержащие ассоциации в мантии Земли и их значение в образовании ультракалийевых магм.

3. Окислительно-восстановительные условия в мантии Земли и методы их оценки из минеральных равновесий. Причины закономерного изменения парциального давления кислорода в мантии Земли.

4. Надкритические флюиды в мантии Земли. Понятие второй критической точки и ее петрологическое значение. «Высокоплотные флюиды» в мантии, их составы, модели формирования и связь с магматизмом.

5. Модельные краевые системы перидотитового тетраэдра и особенности плавления в них. Плавление природных перидотитов без участия летучих компонентов.

6. Плавление перидотитов без участия флюидов и в присутствии водного флюида. Модели генезиса коматиитов.

7. Плавление водосодержащих перидотитов. Роль амфиболов и флогопита при плавлении перидотитового вещества мантии. Модели генезиса щелочных магм и лампроитов.

8. Плавление карбонатсодержащих перидотитов. Роль карбонатов при плавлении перидотитового вещества мантии. Модели генезиса кимберлитов и карбонатитов.

9. Плавление с участием восстановленных флюидов. Редокс плавление и его возможная связь с алмазообразованием.

10. Методы минералогической термобарометрии мантийных ассоциаций.

Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине.

Результаты обучения	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания: фазовые соотношения минералов, флюидов и	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания

расплавов, магматические, метаморфические и метасоматические процессы в мантии Земли на различных ее глубинах.				
Умения: расчеты термодинамических свойств минералов при высоких давлениях; анализ диаграмм фазовых соотношений минералов, флюидов и расплавов.	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает неточности непринципиального характера	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение использовать физико-химические расчеты.	Успешное умение использовать физико-химические расчеты применительно к минеральным ассоциациям мантии Земли.
Владения: принципами построения фазовых диаграмм, владение 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.