

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

Минеральные равновесия

Авторы-составители: Перчук А.Л., 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

Целью курса "Минеральные равновесия" является приобретение знаний об основах минералогической термобарометрии и использовании этого метода для восстановления термодинамических условий образования (температуры, давления, активностей летучих компонентов) и эволюции метаморфических и магматических горных пород.

Задачи - освоение студентами термодинамики минеральных равновесий, расчет диаграмм фазового соответствия, вывод общего принципа фазового соответствия и ознакомление с возможностями его использования для создания и совершенствования минералогических термометров и барометров.

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

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

Дисциплина «Минеральные равновесия» тесно связана с многими дисциплинами и курсами, читаемыми студентам в течение 1-4 годов обучения, наиболее тесно - с такими курсами как «Неорганическая химия», «Физическая химия», «Петрология», «Основы физической геохимии», «Кристаллография и кристаллохимия», «Минералогия», «Экспериментальная и техническая петрология», «Основы математического моделирования в петрологии» и «Локальные методы исследования вещества». «Минеральные равновесия» вместе с «Теорией фазового соответствия» являются историческим и логическим продолжением курса «Термодинамика породообразующих минералов». Знания и навыки, полученные при освоении дисциплины «Минеральные равновесия», необходимы для освоения дисциплины "Формации метаморфических пород", «Региональный метаморфизм», некоторых курсов по выбору, а также для выполнения магистерских дипломных работ и написания статей в научные журналы.

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

Компетенции выпускников, формируемые (полностью или частично) при реализации дисциплины:

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

ОПК-5.М Способность использовать современные вычислительные методы и компьютерные технологии для решения задач профессиональной деятельности.

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

СПК-5.М Способность использовать методы минералогической термометрии и барометрии для реконструкции параметров петрологических процессов.

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):

Знать: теорию и общий принцип фазового соответствия; основные типы минеральных равновесий, используемых в качестве минералогических термометров и барометров; основные тренды эволюции термодинамических параметров метаморфизма, отражающих различные геотектонические процессы.

Уметь: использовать термодинамические потенциалы для расчета диаграмм фазового соответствия, выводить общий принцип фазового соответствия, выполнять калибровки и использовать минералогические термометры и барометры.

Владеть: методами минералогической термометрии и барометрии; методами реконструкции эволюции термодинамических параметров метаморфизма; принципами построения диаграмм фазового соответствия.

4. Формат обучения – семинары

5. Объем дисциплины (модуля) составляет **3** з.е., в том числе **28** академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (семинары), **80** 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

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Дисциплина «Минеральные равновесия» для магистрантов 1 года обучения кафедры петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ направлена на приобретение знаний об основах минералогической термобарометрии и грамотном использовании этого метода для восстановления термодинамических условий образования (температуры, давления, активностей летучих компонентов) и эволюции метаморфических и магматических горных пород. Наряду с изложением основ расчета диаграмм фазового соответствия, данный курс открывает перед студентами возможности создания новых термометров, барометров, показателей режима H_2O , CO_2 , F, C1 и т. п.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, часы	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, часы						
		Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного	Занятия семинарского типа	Всего			
Раздел 1. Межфазовое распределение компонентов				2	2	5		
Раздел 2. Обменные минеральные равновесия				2	2	5		
Раздел 3. Соли поликремниевых кислот				2	2	5		
Раздел 4. Закономерности распределения компонентов между минералами				2	2	5		
Раздел 5. Принцип фазового соответствия				2	2	5		
Раздел 6. Смещенные минеральные равновесия				2	2	5		
Раздел 7. Двуполевошпатовая геотермометрия.				2	2	5		
Раздел 8. Нефелин-полевошпатовый и магнетит-ильменитовый геотермометры				2	2	5		
Раздел 9. Минералогические геотермометры с участием амфибола				2	2	5		
Раздел 10. Гранат-биотитовый и гранат-кордиеритовый геотермометры				2	2	5		
Раздел 11. Гранат-клинопироксеновый и гранат-ортопироксеновый геотермометры				2	2	5		
Раздел 12. Минералогическая барометрия				2	2	5		
Раздел 13. Термобарометрия на основе рассеянных элементов в минералах				2	2	5		
Раздел 14. Восстановление P-T трендов метаморфизма				2	2	5		
Промежуточная аттестация <i>зачет</i>						10		
Итого	108			28		80		

Содержание разделов дисциплины:

1. Межфазовое распределение компонентов

Введение. Коэффициент распределения и диаграммы фазового соответствия.

2. Обменные минеральные равновесия

Температурная зависимость коэффициента распределения в идеальном растворе. Коэффициент для идеального и неидеального распределения компонентов.

3. Соли поликремниевых кислот

Температурная зависимость коэффициента распределения при наличии фазовых переходов. Законы Коновалова и расчетные методы вывода диаграмм фазового соответствия.

4. Закономерности распределения компонентов между минералами

Общие закономерности распределения компонентов между сосуществующими минералами и основные причины возникновения зональности в минералах. Сравнительная сила кислотных и основных компонентов.

5. Принцип фазового соответствия

Сравнительная сила кремнекислотных радикалов и принцип фазового соответствия. Систематизация силикатов на основе химического, кристаллохимического признаков и сингонии.

6. Двуполевошпатовая геотермометрия

Фазовое соответствие Fe-Mg минералов и эффекты перераспределения Fe и Mg между силикатами. Системы плагиоклаз-щелочной полевой шпат и нефелин-полевой шпат.

7. Нефелин-полевошпатовый и магнетит-ильменитовый геотермометры

Магнетит-ильменитовый термометр. Его применение. Фазовое соответствие Fe-Mg-минералов и вывод системы термодинамически взаимосогласованных термометров. Амфибол – плагиоклазовый термометр. Номенклатура моноклинных амфиболов. Номенклатура амфиболов Л.Л. Перчука. Диаграмма фазового соответствия «амфибол-плагиоклаз». Амфибол-плагиоклазовый термометр. Эмпирическая калибровка мономинерального термобарометра. Амфибол-гранатовый термометр. Поля стабильности амфиболов. Амфибол-клинопироксеновый термометр. Амфибол-ортопироксеновый термометр.

8. Минералогические геотермометры с участием амфибола

Вывод и использование минералогических термометров с участием граната, амфибола, биотита и плагиокалаза.

9. Гранат-биотитовый и гранат-кордиеритовый геотермометры

Вывод и использование минералогических термометров с участием граната, клино- и ортопироксена.

10. Гранат-клинопироксеновый и гранат-ортопироксеновый геотермометры

Особенности смещенных равновесий с участием граната и ортопироксена, плагиокалаза, пироксена и кварца, их использование в термобарометрии.

11. Минералогическая барометрия

Минеральные равновесия с участием летучих компонентов – воды, углекислого газа и кислорода.

12. Минералогическая барометрия

Современные сенсоры температуры и давления, основанные на содержаниях рассеянных элементов в гранате и пироксенах, а также на основе изотопной геотермометрии.

13. Термобарометрия на основе рассеянных элементов в минералах

Химическая зональность в минералах и ее использования в восстановлении термодинамический условий образования пород.

14. Восстановление P-T трендов метаморфизма

P-T тренды метаморфизма и их применение при геодинамическом моделировании.

Рекомендуемые образовательные технологии:

В курсе «Минеральные равновесия» используются образовательные технологии полного усвоения, т.е. построение учебного процесса так, чтобы подвести всех учащихся к единому, чётко заданному уровню овладения знаниями и умениями. В качестве формы контроля знаний применяются проверочные и контрольные работы, решения домашних заданий и сдача задач, предлагавшихся в течение семестра. Важным элементом преподавания дисциплины являются презентации и доклады учащихся на основе дополнительных материалов (статей, книг), совместный разбор ошибок при выполнении задач и контрольных работ. Для решения поставленных задач учащиеся могут использовать компьютерные программы, как общего назначения, так и специализированные. Критерием выполнения задания наряду с правильным ответом является также корректность хода решения. Самостоятельная работа предполагает изучение литературы, рекомендуемой преподавателем.

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.

Примеры типовых домашних заданий и задач для проведения текущего контроля:

1. Используя экспериментальные данные по распределению Fe и Mg между гранатом и биотитом (кордиеритом) (Перчук и др., 1983) и данные по объемам миналов оцените ΔH^0 и ΔS^0 обменной реакции. По полученным данным постройте диаграмму фазового соответствия для этого равновесия. При выполнении задания принять, что твердые растворы пироп-альмандин и флогопит-аннит (Mg-Fe кордиерит) близки к идеальным. Для выполнения задания предоставляется файл с экспериментальными данными.

2. Используя экспериментальные данные по распределению Fe и Mg между гранатом и оливином и данные по объемам миналов оцените ΔH^0 и ΔS^0 обменной реакции, а также параметр взаимодействия W_{MgFe} в твердом растворе оливина. По полученным данным постройте диаграмму фазового соответствия для этого равновесия. При выполнении задания принять, что твердый раствор пироп-альмандин близок к идеальному, а твердый раствор форстерит-фаялит близок к регулярному. Для выполнения задания предоставляется файл с экспериментальными данными.

3. В метаморфической породе сосуществуют гранат, ортопироксен, магнетит и кварц. $X_{En}^{Opx}=0.2$, $X_{Ok}^{Opx}=0.03$, $X_{Mg}^{Grt}=0.05$. Определите фугитивность кислорода во флюиде при давлении 7 кбар. Гранат (пироп Ppr-альмандин Alm) - идеальный раствор. Ортопироксен (энстатит En-феросиллит Fs-ортокорунд Ok) – регулярный раствор. $G_{Opx}^c = W_{MgAl}X_{En}X_{Ok} + W_{FeAl}X_{Fs}X_{Ok}$, где $W_{MgAl} = -26944.5 - 0.58 \cdot P$ (Дж), $W_{FeAl} = -32213.3 - 0.69 \cdot P$ (Дж). Для выполнения задания предоставляется таблица с термодинамическими данными.

4. Определите температуру равновесия граната ($[Mg/(Mg+Fe)]Grt = 0.19$) и биотита ($[Mg/(Mg+Fe)]Bt = 0.59$), содержащего фтор, при давлении 6 кбар, если: а. не учтено содержание фтора в биотите, а твердые растворы гранат и биотита являются идеальными; б. если мольная доля фтора в биотите, $X_F = F/(F+OH) = 0.2$, а биотит является многопозиционным раствором четырех миналов (фтор-флогопита, флогопита, фтор-аннита и аннита), а парциальные молярные энергии Гиббса флогопита и аннита описываются следующими выражениями

$$G_{Phl} = G_{Phl}^{id} + X_{Bt}^{Fe} \cdot X_{Bt}^F \cdot \Delta G^{int}$$

$G_{Ann} = G_{Ann}^{id} - X_{Bt}^{Mg} \cdot X_{Bt}^F \cdot \Delta G^{int}$, где ΔG^{int} — изменение энергии Гиббса во внутренней обменной реакции

$Phl + F-Ann = F-Phl + Ann$. Для выполнения задания предоставляется таблица с термодинамическими данными.

5. Процесс чарнокитизации (образование парагенезиса Орх+Kfs) обуславливается притоком водных флюидов, обогащенных солями калия и натрия. Обнаружено, что в образовавшемся чарноките сосуществуют ортопироксен ($X_{Mg}=0.4$), биотит ($X_{Mg}=0.49$) и калиевый полевой шпат ($X_{San}=0.85$). По плотности флюидных включений было определено, что давление, при котором происходил процесс чарнокитизации, составляло 5 кбар. Определить соотношение активностей K и Na во флюиде, сосуществующем с данной минеральной ассоциацией. Ортопироксен - симметричный раствор энстатита (En) и ферросилита (Fs) : $W_{MgFe}^H = -2372$ кал; $W_{MgFe}^S = -1.688$ кал/моль/К. Биотит - идеальный раствор флогопита (Phl) и аннита (Ann). Водный K-Na раствор - идеальный. Калиевый полевой шпат - субрегулярный раствор

$$G_{San}^e = 2 * W_{21} * X_{San} X_{Ab}^2 + W_{12} (X_{Ab}^3 - X_{San} X_{Ab}^2)$$

$$G_{Ab}^e = 2 * W_{12} * X_{Ab} X_{San}^2 + W_{21} (X_{San}^3 - X_{Ab} X_{San}^2)$$

$$W_{12} = 6560 - 2.486 * T + 0.074 * P$$

$$W_{21} = 4612 - 2.504 * T + 0.101 * P$$

где $X_{San} = K/(K+Na)$ и $X_{Ab} = 1 - X_{San}$

Для выполнения задания предоставляется таблица с необходимыми термодинамическими данными.

6. В метаморфической породе сосуществуют гранат, ортопироксен, магнетит и кварц. $X_{Mg}^{Opx}=0.2$, $X_{Mg}^{Grt}=0.05$. Определить фугитивность кислорода во флюиде при давлении 7 кбар. Гранат (пироп-альмандин) и ортопироксен (энстатит-ферросилит) являются идеальными растворами. Для выполнения задания предоставляется таблица с необходимыми термодинамическими данными.

7. В P-T координатах рассчитайте изоплеты X_{Mg}^{Grt} и X_{Mg}^{Crd} в ассоциации гранат+кордиерит+силлиманит+кварц

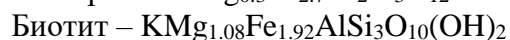
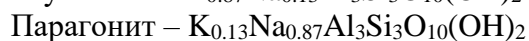
$$X_{Mg}^{Grt}=0.31, X_{Mg}^{Crd}=0.79$$

$$X_{Mg}^{Grt}=0.50, X_{Mg}^{Crd}=0.92$$

$$X_{Mg}^{Grt}=0.20, X_{Mg}^{Crd}=0.75$$

приняв во внимание, что ΔV возможной обменной реакции равен нулю, а гранат и кордиерит являются твердыми растворами близкими к идеальным. Оцените T и P , при которых сосуществуют минералы с заданными составами. Для выполнения задания предоставляется таблица с термодинамическими данными.

8. В метапелите сосуществуют гранат, мусковит, парагонит, биотит, силлиманит и кварц. Составы сосуществующих фаз следующие:



Определите давление, при которых стабильна данная ассоциация. Твердые растворы граната и биотита принять близкими к идеальным. Для выполнения задания предоставляется таблица с необходимыми термодинамическими данными.

9. Определите активность воды во флюиде, сосуществующем с минеральной ассоциацией чарнокита: ортопироксен ($X_{Mg} = 0.47$), биотит ($X_{Mg} = 0.58$, $X_F = 0.1$), санидин ($X_K = 1$) и кварц, при давлении 6.5 кбар. Ортопироксен – регулярный твердый раствор энстатита (En) и ферросилита (Fs): $W_{MgFe}^H = -2372$ кал/моль, $W_{MgFe}^S = -1.688$ кал/моль/К. Биотит – идеальный твердый раствор флогопита, аннита, F-флогопита и F-аннита. Для выполнения задания предоставляется таблица с термодинамическими данными.

10. В метапелите сосуществуют гранат ($X_{Mg}^{Grt} = 0.3$), биотит ($X_{Mg}^{Bt} = 0.53$), санидин ($X_K^{Fsp}=1$), плагиоклаз, силлиманит и кварц. С помощью P-T диаграммы плавления гранитной эвтектики при различных активностях воды определить, возможно ли выплавление эвтектического расплава в этом метапелите при 5 кбар. Биотит и гранат - идеальные твердые растворы. Для выполнения задания предоставляется таблица с необходимыми термодинамическими данными.

Для текущего контроля успеваемости студентов в ходе семестра проводятся контрольные опросы и работы.

Примерный перечень вопросов для проведения текущего контроля/ Темы контрольных работ:

1. Теоретические задания на усвоение закона Нернста (закона идеального перераспределения) и свойств диаграмм фазового соответствия.
2. Задание на расчет энтальпийного и энтропийного эффектов и построение диаграммы фазового соответствия для Fe-Mg обменного равновесия между гранатом и биотитом (кордиеритом) в случае идеального распределения компонентов между сосуществующими фазами с использованием экспериментальных данных.
3. Задание на расчет энтальпийного и энтропийного эффектов и построение диаграммы фазового соответствия для Fe-Mg обменного равновесия между гранатом и оливином (ортопироксеном) в случае неидеального распределения компонентов между сосуществующими фазами с использованием экспериментальных данных.
4. Теоретические задания на усвоение общего принципа фазового соответствия.
5. Определение температуры из уравнения гранат-биотитового равновесия с учетом вхождения фтора в биотит.
6. Определение температуры и соотношения активностей щелочей во флюиде для чарнокитовой ассоциации с использованием обменных равновесий ортопироксен-биотит и щелочной полевой шпат - флюид.
7. Определение температуры и фугитивности кислорода для ассоциации гранат-ортопироксен-магнетит-кварц.
8. Определение и расчет независимых реакций в системе FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂.
9. T-X диаграммы для ассоциации гранат-кордиерит-силлиманит-кварц в системе FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂.
10. Изоплеты равной магнезиальности кордиерита и граната в P-T координатах для ассоциации гранат-кордиерит-силлиманит-кварц.
11. Температуры и давления на основе смещенных равновесий в системе мусковит-парагонит-гранат-биотит-силлиманит-кварц.
12. Температуры и активности воды для ассоциации ортопироксен-биотит-калиевый полевой шпат-кварц.
13. Температуры, давления и активности воды для ассоциации гранат-биотит-калиевый полевой шпат-силлиманит-кварц.
14. P-T параметры минеральных равновесий с использованием компьютерных программ GEOPATH и TWQ.

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

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации:

1. Коэффициент распределения компонентов между сосуществующими минералами переменного состава. Зависимость коэффициента распределения от температуры и давления.
2. Правило Соболева-Рамберга. Оценки сравнительной силы кислотных и основных компонентов.
3. Общий принцип фазового соответствия.
4. Главнейшие диаграммы фазового соответствия: методы их вывода и относительная точность
5. Межфазовое распределение компонентов: основные уравнения, два типа равновесий, влияние состава фаз на изотермическое распределение.
6. Методы расчета диаграмм фазового соответствия.

7. Коэффициент распределения: зависимость от T,P и состава фаз.
8. Петрологическое приложение теории фазового соответствия. 1. Смещенное равновесие и диаграммы PX и TX. Коэффициент разделения и его зависимость от T и P.
9. Кислотные и основные свойства компонентов. Общий принцип фазового соответствия.
10. Зональность сосуществующих минералов и геотермобарометрия.
11. P-T тренды эволюции метаморфических комплексов и методы геодинамического моделирования.

8. Ресурсное обеспечение:

Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. Москва: Недра, 1976.

Перчука Л.Л. "Теория фазового соответствия" курс лекций <http://geo.web.ru/~serg/Perchuk/>
Вуд Б., Фрейзер Д.. Основы термодинамики для геологов. Москва: Мир, 1981.

Аранович Л.Я. Минеральные равновесия многокомпонентных твердых растворов. Москва: Наука, 1991.

- дополнительная литература:

Перчук А.Л., Сафонов О.Г., Сазонова Л.В., Тихомиров П.Л., Плечов П.Ю., Шур М.Ю. Основы петрологии магматических и метаморфических процессов. Учебное пособие. ООО ИД "КДУ" Москва. 2015. 472 с.

Перчук А. Л., Сафонов О.Г., Плечов П.Ю. Введение в петрологию. Учеб. пособие. М: ИНФРА-М. 2014. 130 с..

Материально-технического обеспечение: - персональные компьютеры.

9. Язык преподавания – русский.

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

11. Автор (авторы) программы – Перчук А.Л., Сафонов О.Г.