

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**

### **Теория фазового соответствия**

Авторы-составители: Перчук А.Л., Сафонов О.Г.

**Уровень высшего образования:**  
*Магистратура ИМ*

**Направление подготовки:**  
**05.04.01 Геология**

**Направленность (профиль) ОПОП:**

**Геохимия**

**Магистерская программа**

**Петрология**

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 магистратуры, реализуемые 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 "Теория фазового соответствия" является приобретение знаний о теоретических 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.

### **Краткое содержание дисциплины (аннотация):**

Дисциплина «Теория фазового соответствия» 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.

**1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО** – вариативная часть, профессиональный цикл, тип дисциплины - обязательный, курс – I, семестр – 1.

### **2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:**

Дисциплина «Теория фазового соответствия» тесно связана с многими дисциплинами и курсами, читаемыми студентам в течение 1-4 годов обучения. Наиболее тесно дисциплина «Теория фазового соответствия» связана с такими общенаучными курсами как «Неорганическая химия» и «Физическая химия». Среди дисциплин профильной подготовки использует навыки и знания, полученные из дисциплин «Петрология», «Основы физической геохимии», «Кристаллография и кристаллохимия», «Минералогия», «Экспериментальная и техническая петрология» и «Основы математического моделирования в петрологии» и «Локальные методы исследования вещества». «Теория фазового соответствия» является историческим и логическим продолжением курса «Термодинамика породообразующих минералов». Знания и навыки, полученные при освоении дисциплины «Теория фазового соответствия», необходимы для освоения дисциплины "Формации метаморфических пород", 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.**

<b>Компетенции выпускников (коды)</b>	<b>Индикаторы (показатели) достижения компетенций</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), сопряженные с компетенциями</b>

СПК-4.М Способен использовать различные типы петрологических и петрохимических диаграмм для решения научных и практических петрологических задач.	<b>М.СПК-4. И-1.</b> Знает основные типы петрологических и петрохимических диаграмм.	<b>Знать:</b> основные типы петрологических и петрохимических диаграмм;
	<b>М.СПК-4. И-2.</b> Понимает базовые принципы построения различных типов петрологических и петрохимических диаграмм.	<b>Уметь:</b> выбирать наиболее подходящие типы петрологических и петрохимических диаграмм для решения конкретных задач;
	<b>М.СПК-4. И-3.</b> Владеет навыками использования различных типов петрологических и петрохимических диаграмм для решения научных и практических петрологических задач.	<b>Владеть</b> приемами использования петрологических и петрохимических диаграмм.
СПК-5.М Способен использовать методы минералогической термометрии и барометрии для реконструкции параметров петрологических процессов.	<b>М. СПК-5. И-1.</b> Использует на практике минералогические термометры и барометры при решении исследовательских и прикладных задач профессиональной деятельности.	<b>Знать:</b> наиболее точные минеральные термометры и барометры; <b>Уметь:</b> правильно определять применимость минералогических термометров и барометров в конкретных случаях <b>Владеть:</b> физико-химическими методами реконструкции условий метаморфизма пород

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

**5. Объем дисциплины (модуля)** составляет 5 з.е., 180 академических часов, в том числе 56 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (28 часов – занятия лекционного типа, 28 часов – занятия семинарского типа) и 124 академических часа на самостоятельную работу обучающихся. Форма аттестации – экзамен.

**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
		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	4	8
Раздел 2. Обменные минеральные равновесия		2		2	4	8
Раздел 3. Соли поликремниевых кислот		2		2	4	8
Раздел 4. Закономерности распределения компонентов между минералами		2		2	4	8
Раздел 5. Принцип фазового соответствия		2		2	4	8
Раздел 6. Смещенные минеральные равновесия		2		2	4	8
Раздел 7. Двуполевошапатовая геотермометрия.		2		2	4	8
Раздел 8. Нефелин-полевошпатовый и магнетит-ильменитовый геотермометры		2		2	4	8
Раздел 9. Минералогические геотермометры с участием амфибола		2		2	4	8
Раздел 10. Гранат-биотитовый и гранат-кордиеритовый геотермометры		2		2	4	8
Раздел 11. Гранат-клинопироксеновый и гранат-ортопироксеновый геотермометры		2		2	4	8
Раздел 12. Минералогическая барометрия		2		2	4	8
Раздел 13. Термобарометрия на основе рассеянных элементов в минералах		2		2	4	8
Раздел 14. Восстановление P-T трендов метаморфизма		2		2	4	10
Промежуточная аттестация <i>экзамен</i>						10
<b>Итого</b>	<b>180</b>			<b>56</b>		<b>124</b>

## **Содержание разделов дисциплины:**

### **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 «Теория фазового соответствия» 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. 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. 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.**

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-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>.
9. T-X диаграммы для ассоциации гранат-кордиерит-силлиманит-кварц в системе FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>.
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.

**Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине**

Результаты обучения	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
<b>Знания:</b> теория 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.	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания



<p><b>Умения:</b> использовать термодинамические потенциалы для расчета диаграмм фазового соответствия, выводить общий принцип фазового соответствия, выполнять калибровки и использовать минералогические термометры и барометры</p>	<p>Умения отсутствуют</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое умение, допускает неточности не принципиального характера</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умения использовать термодинамические потенциалы для расчета диаграмм фазового соответствия, выводить общий принцип фазового соответствия, выполнять калибровки и использовать минералогические термометры и барометры.</p>	<p>Успешное умение использовать термодинамические потенциалы для расчета диаграмм фазового соответствия, выводить общий принцип фазового соответствия, выполнять калибровки и использовать минералогические термометры и барометры.</p>
<p><b>Владения:</b> методами минералогической термометрии и барометрии; методами реконструкции эволюции термодинамических параметров метаморфизма; принципами построения диаграмм фазового соответствия.</p>	<p>Навыки владения методами минералогической термометрии и барометрии отсутствуют</p>	<p>Фрагментарное владение методикой, наличие отдельных навыков</p>	<p>В целом сформированные навыки использования минералогической термометрии и барометрии; методами реконструкции эволюции термодинамических параметров метаморфизма; принципами построения диаграмм фазового соответствия.</p>	<p>Владение минералогической термометрией и барометрией; методами реконструкции эволюции термодинамических параметров метаморфизма; принципами построения диаграмм фазового соответствия.</p>

## 8. Ресурсное обеспечение:

### А) Перечень основной и дополнительной литературы.

#### - основная литература:

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

Перчук 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..

**Б) Перечень программного обеспечения:** Microsoft Office PowerPoint

**В) Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**

**Г) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»:**

**Д) Материально-техническое обеспечение:**

а) помещение – аудитория, рассчитанная на группу из 10 учащихся;

б) оборудование – мультимедийный проектор, компьютер, экран, выход в Интернет, персональные компьютеры.

**9. Язык преподавания** – русский.

**10. Преподаватель (преподаватели)** – Перчук А.Л., Сафонов О.Г.

**11. Разработчик программы** – Перчук А.Л., Сафонов О.Г.