

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ФИЦ КНЦ РАН)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

По дисциплине Б1.В.ДВ.01.02 Основы физико-химической петрологии
указывается цикл (раздел) ОП, к которому относится дисциплина, название дисциплины

Для направления подготовки (специальности) 05.04.01 Геология
код и наименование направления подготовки (специальности)

Направленность программы (профиль) Прикладная геохимия, минералогия и петрология
наименование профиля /специализаций/образовательной программы

Квалификация выпускника, уровень подготовки магистр
(указывается квалификация (степень) выпускника в соответствии с ФГОС ВО)

Апатиты

2020

Лист согласования

1 Разработчик:

доцент
должность

УАиМ


подпись

Д.Р. Зозуля
И.О. Фамилия

2. Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании учебно-методической комиссии управления аспирантуры и магистратуры 29 июня 2020 года, протокол № 02.

Председатель УМК УАиМ

29.06.2020

дата

подпись



Л.Д. Кириллова

И.О. Фамилия

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Методические указания составлены в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта по образовательной программе высшего образования – программе магистратуры по направлению подготовки 05.04.01 Геология, утвержденного приказом Минобрнауки России от 28.08.2015 г. № 912.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель дисциплины: – изучение и применение законов физической химии для познания природных геологических процессов.

Задачи дисциплины: заложить основы системного знания о физико-химической сущности процессов магмообразования и породообразования, методах физико-химического анализа (интерпретации) геологических данных.

В результате освоения программы дисциплины «Основы физико-химической петрологии» студенты направления 05.04.01 Геология

должны знать:

- физико-химические принципы классификации магматических и метаморфических горных пород;
- принципы и правила построения диаграмм состояния (фазового равновесия);
- возможности использования диаграмм состояния, их достоверность, ограничения и адекватность геологическим процессам.

должны уметь:

- читать диаграммы состояния, прослеживать по ним тренды плавления и кристаллизации фазовых ассоциаций;
- определять физико-химические условия образования магматических и метаморфических пород и их серий (выбор систем, изобарических и изоплетических сечений);
- определять исходный расплав и субстрат;
- сопоставлять теоретические пути кристаллизации с реальными ассоциациями горных пород).

должны владеть: необходимыми знаниями и навыками методов исследования и диагностики минералов.

Планируемые результаты обучения в рамках данной дисциплины

Процесс изучения дисциплины (модуля) «Основы физико-химической петрологии» направлен на формирование элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО 05.04.01 Геология (уровень магистратуры). Результаты формирования компетенций и обучения представлены в таблице.

Таблица 1 – Результаты обучения

№ п/п	Код компетенции	Компоненты компетенции, степень их реализации	Результаты обучения
1.	ОК – 3. Готовность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала.	Компоненты компетенции соотносятся с содержанием дисциплины, и компетенция реализуется полностью	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основные понятия, цели, задачи физико-химической петрологии. <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - формулировать цели и определять пути их достижения; - находить информацию в различных источниках. <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами сбора информации, ее обработки и анализа.
2.	ОПК – 1. Способность самостоятельно приобретать, осмысливать, структурировать и использовать в профессиональной деятельности новые знания и умения, развивать свои инновационные способности.	Компоненты компетенции соотносятся с содержанием дисциплины, и компетенция реализуется полностью	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основные проблемы и задачи физико-химической петрологии. <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - самостоятельно анализировать и систематизировать новые знания; - структурировать и использовать новые знания; - развивать инновационные способности. <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами адаптации новых знаний в профессиональной деятельности.
3.	ПК – 1. Способность формировать диагностические решения профессиональных задач путем интеграции фундаментальных разделов геологических наук и специализированных знаний, полученных при освоении программы магистратуры.	Компоненты компетенции соотносятся с содержанием дисциплины, и компетенция реализуется полностью	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - базовые понятия фундаментальных разделов геологических наук и физико-химической петрологии. <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - формировать диагностические решения профессиональных задач путем интеграции фундаментальных разделов геологических наук и физико-химической петрологии. <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - методами интеграции фундаментальных разделов геологических наук и физико-химической петрологии.

Перечень дисциплин и их разделов, усвоение которых необходимо студентам для изучения данной дисциплины.

- Общая геология – понятия о горных породах и их классификациях, структурах земной коры и причинах их формирования.
- Минералогия - классификация и номенклатура породообразующих и рудных минералов, их физические и химические свойства.
- Геохимия – поведение породообразующих элементов в различных геологических процессах.
- Петрография – минеральный и химический состав магматических и метаморфических горных пород, их номенклатура, структурно-текстурные особенности, форма залегания и геодинамические условия формирования.

Таблица 2 - Перечень практических работ

№ п/п	Наименование практических работ	Кол-во часов	Номер темы по табл. 4 рабочей программы
1	Термодинамические расчеты субсолидусных фазовых реакций по минимизации свободной энергии Гиббса	6	2
2	Нанесение составов на 2-х компонентные изобарические сечения. Прослеживание трендов кристаллизации и плавления.	4	6
3	Нанесение составов на 3-х компонентные изобарические сечения. Прослеживание трендов кристаллизации и плавления.	4	7
4	Нанесение составов на 4-х компонентные изобарические сечения. Прослеживание трендов кристаллизации и плавления.	4	8
5	Систематика магматических горных пород на уровне семейств, родов и индивидов	4	12
6	Выбор систем, изобарических и изоплетических сечений, определение исходного расплава, прослеживание трендов кристаллизации и сопоставление их с реальными ассоциациями пород	4	14
7	Определение (оценка) физико-химических условий образования конкретных горных пород с применением диаграмм состояния и минералогических термометров и барометров	2	15
ИТОГО:		28	

Практическое занятие № 1, 2, 3

Тема: «Термодинамические расчеты субсолидусных фазовых реакций по минимизации свободной энергии Гиббса» 6 часов

На занятии предполагается закрепление учащимися основных понятий химической термодинамики в интерактивной либо активной форме. Рассматриваются простые физико-химические системы: определение, классификация (по числу компонентов, степени изоляции, фазовому составу). Дается определение понятию фазы, их классификация, рассматривается явление полиморфизма. Раскрывается понятие компонентов: определение, выбор химического состава, число независимых компонентов. Опираясь на первое начало термодинамики описывается связь между интенсивными ($P, T, \mu^a \dots \mu^k$) и экстенсивными ($V, S, m^a \dots m^k$) параметры фазового состояния системы. Для различных типов систем выводятся дифференциальные уравнения термодинамических функций (потенциалов): внутренней энергии, энтальпии, свободной энергии Гельмгольца, свободной энергии Гиббса. Определяется их физический смысл, общие свойства, графический образ мольного термодинамического потенциала изотермо-изобарической системы. Рассматриваются общие условия химического и термодинамического равновесия, раскрывается термодинамический смысл понятий равновесных и неравновесных, обратимых и необратимых процессов. Определяется влияние интенсивных параметров фазового состояния на положение равновесия (принцип Ле Шателье). Правила фаз для различных типов систем.

Помимо того, учащиеся должны самостоятельно выполнить ряд простейших термодинамических расчетов:

- (а) определение приращения энтальпии для 1 моль одного из минералов (диопсида, волластонита и др.) при заданном термальном режиме;
- (б) расчет энтропии 1 моль того же минерала для заданной температуры;
- (в) оценка изменения энергии Гиббса для 1 моль того же минерала при заданном термальном режиме в изобарических и при заданном увеличении давления в изотермических условиях.

В рамках практического занятия студентам предлагается рассчитать направление реакции при заданных P-T параметрах с использованием справочников и компьютерных программ.

Практическое занятие № 4,5

Тема: «Нанесение составов на 2-х компонентные изобарические сечения. Прослеживание трендов кристаллизации и плавления» 4 часа.

Два типа систем: а) конденсированные, б) с летучими компонентами. Типы диаграмм состояния конденсированных систем. Т-Р-х диаграммы (диаграммы в координатах температура - давление - состав). Методы изображения графического состава. Двухкомпонентная диаграмма составов в барицентрических координатах – принцип построения. Диаграммы плавкости (изобарические сечения Т-Р-х диаграмм для диапазона температур, охватывающего условия плавления минеральных фаз). Основные понятия: *ликвидус, солидус, субликвидус, субсолидус, сольвус, конгруэнтное плавление, инконгруэнтное плавление, перитектическая реакция, перитектика, перитектическая линия, эвтектика, котектика.*

Главные типы диаграмм плавкости, характеризующих условия плавления неорганических веществ:

- I. *диаграммы плавкости систем с неограниченной растворимостью в жидком состоянии и твердыми фазами постоянного состава, в том числе а) с одной эвтектикой (без соединений); б) с соединениями, плавящимися конгруэнтно; в) с соединениями, плавящимися инконгруэнтно;*
- II. *диаграммы плавкости систем с неограниченной растворимостью в жидком состоянии и твердыми фазами переменного состава (твердыми растворами) а) с неограниченными твердыми растворами; б) с ограниченными твердыми растворами; в) с соединениями (постоянного и (или) переменного состава)*
- III. *диаграммы плавкости систем с ликвацией и твердыми фазами постоянного состава.*
- IV. *диаграммы состояния систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии и твердыми фазами переменного состава.*

Описание вывода изобарического сечения Т-х через изобарно-изотермические потенциалы для различных температур на примере простейшей системы в конденсированном состоянии – системы с неограниченной растворимостью в жидкой фазе и твердыми фазами постоянного состава, не образующими между собой соединений (*диаграммы плавкости с одной эвтектикой*). Уравнение Шредера. Самостоятельное построение диаграммы плавкости с одной эвтектикой для системы анортит-диопсид с помощью смешанного аналитически-графического метода. Анализ трендов кристаллизации и плавления для полученной диаграммы, в т.ч. запись схемы плавления и факторов состояния. Другие диаграммы плавкости с одной эвтектикой, важные для физико-химической петрологии: альбит – кремнезем, титанит – анортит, фаялит – магнетит,

форстерит – шпинель. Важнейший петрологический вывод - «принцип эвтектики» (не выполняется для случая, когда солидус является непрерывным многокомпонентным твердым раствором):

1. При кристаллизации первыми выделяются, а при плавлении последними расплавляются фазы, находящиеся в избытке по отношению к эвтектическому составу.
2. Кристаллизация всегда заканчивается, а расплавление всегда начинается в эвтектике.

Изотермические сечения G-x и T-x диаграмма плавкости в части, отражающей особенности *систем с конгруэнтно плавящимися соединениями*. Дистетика. Причины появления сингулярного максимума и разделения системы на две подсистемы. Анализ трендов кристаллизации и плавления для диаграммы метасиликат натрия – кремнезем. Другие диаграммы систем с соединениями, плавящимися конгруэнтно, важные для физико-химической петрологии: альбит – кремнезем, титанит – анортит, фаялит – магнетит, форстерит – шпинель.

Изотермические сечения G-x и T-x диаграмма плавкости в части, отражающей особенности *систем с инконгруэнтно плавящимися соединениями*. Анализ трендов кристаллизации и плавления для диаграмм лейцит – кремнезем и форстерит – кремнезем.

Вывод диаграммы плавкости бинарной системы *с неограниченной растворимостью в жидком и твердом состоянии* при помощи G-x диаграмм (изотермических слияний G-T-x диаграмм) и анализ трендов кристаллизации и плавления для систем:

- (а) с монотонным изменением кривых ликвидуса и солидуса, целиком располагающихся в интервале температур плавления чистых компонентов (без минимума и максимума; *I тип твердых растворов Розебома*) на примере систем альбит – анортит, форстерит – фаялит;
- (б) с максимумом на кривых ликвидуса и солидуса (*II тип твердых растворов Розебома*) для общего вида системы (в силу ее малой распространенности);
- (в) с минимумом на кривых ликвидуса и солидуса (*III тип твердых растворов Розебома*) на примере системы геленит-акерманит.

Уравнение Ван-Лаара. Самостоятельный расчет диаграммы плавкости с неограниченной растворимостью в жидком и твердом состоянии для твердого раствора первого типа (система альбит-анортит).

Изотермические сечения G-x и T-x диаграмма плавкости в части, отражающей особенности систем *с ограниченной растворимостью в твердом состоянии с ограниченной*

растворимостью в твердом состоянии а) с монотонной кривой ликвидуса и инконгруэнтной реакцией (*IV тип твердых растворов Розебома*) и б) «эвтектоидного типа» (*V тип твердых растворов Розебома*). Анализ трендов кристаллизации и плавления. Диаграммы плавкости систем с ограниченной растворимостью в твердом состоянии с ограниченной растворимостью в твердом состоянии, важные для физико-химической петрологии: калиевый полевой шпат – альбит, энстатит – диопсид, нефелин – альбит.

На занятии студентам предлагается выполнить задание: проследить тренды кристаллизации и плавления 2-х компонентных систем с разной топологией изобарических сечений: с эвтектикой, с перитектикой, "рыбой" и минимумом.

Практическое занятие №6, 7

Тема: «Нанесение составов на 3-х компонентные изобарические сечения. Прослеживание трендов кристаллизации и плавления» 4 часа.

Способ изображения трехкомпонентного состава на плоскости – трехкомпонентная (треугольная) диаграмма составов в барицентрических координатах. Методика нанесения составов.

Рассматриваются следующие типы трехкомпонентных систем: а) с эвтектикой; б) с двойным химическим соединением, плавящимся конгруэнтно; в) с двойным и тройным химическим соединением, плавящимся инконгруэнтно; г) с твердыми растворами.

В качестве анализируемого материала используются:

- (а) система периклаз – шпинель – форстерит;
- (б) модельный пример;
- (в) системы форстерит – кремнезем – анортит, $MgO-Al_2O_3-SiO_2$;
- (г) системы диопсид – анортит – альбит, калиевый полевой шпат – альбит – кремнезем (гранитная система), нефелин – кальсилит – кремнезем.

На примере наиболее простой системы периклаз – шпинель – форстерит необходимо проиллюстрировать принципиальную схему построения диаграмм плавкости для трехкомпонентной системы путем ее вывода из изотермических сечений G-х для четырехмерной диаграммы G-T-х. Способ графического представления данных - пространственная T-х диаграмма системы (основание - треугольник составов, а по аппликату - температура) или ее проекция на плоскость составов. Изотермическое и изоконцентрационное (политермическое) сечения и их свойства.

В рамках занятий учащимся после обсуждения принципиальной схемы построения

вышеназванных диаграмм и их топологии требуется провести самостоятельный анализ трендов кристаллизации и плавления с записью схем плавления и факторов состояния для выбранных составов.

На занятии студентам предлагается выполнить задание: проследить тренды кристаллизации и плавления 3-х компонентных систем с разной топологией изобарических сечений: с эвтектикой, с перитектикой, "рыбой" и минимумом.

Практическое занятие №8, 9

Тема: «Нанесение составов на 4-х компонентные изобарические сечения. Прослеживание трендов кристаллизации и плавления» 4 часа

Способы изображения четырехкомпонентного состава на плоскости – тетраэдр и тригональная призма составов в барицентрических координатах. Методика нанесения составов. Проектирование тетраэдра составов на плоскость из вершины.

Предполагается ознакомление с диаграммами плавкости для четырехкомпонентных систем, чрезвычайно важных для магматической петрологии:

- CaO-MgO-FeO-SiO₂ (основные компоненты ультраосновных пород);
- диопсид – форстерит – нефелин – кварц (базальтовый тетраэдр) и ларнит – форстерит – нефелин – кварц (расширенный базальтовый тетраэдр), «термальные барьеры»)
- Na₂O-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂ (основные компоненты фойдолитов).

Помимо того, часть занятия необходимо уделить влиянию различных факторов (давления, содержания летучих и их фугитивности, химических потенциалов других в.п.к. и др.) на диаграммы плавкости, а также – обзору специализированного программного обеспечения.

На занятии студентам предлагается выполнить задание: проследить тренды кристаллизации и плавления 4-х компонентных систем с разной топологией изобарических сечений: с эвтектикой, с перитектикой, "рыбой" и минимумом.

Практическое занятие № 10, 11

Тема: «Систематика магматических горных пород на уровне семейств, родов и индивидов» 4 часа

Для свободного понимания материала, излагаемого в рамках данной темы, учащимся следует предварительно ознакомиться с монографией «Комплексная классификация

магматических горных пород» (Дубровский М.И., 2002).

В рамках практических занятий студенты анализируют физико-химические основы комплексной классификации магматических алюмосиликатных горных пород и изучают алгоритм пересчета химического анализа по методике CIPWD. На основе конкретных химических составов производится «ручной» пересчет с последующей классификацией на уровне отрядов, рядов, групп, семейств, родов и индивидов. Те же вычисления повторить с помощью таблицы «*ProgrammaCIPWD.xls*», сопоставить результаты.

На занятии студентам предлагается выполнить задание: по нормативному составу и петрохимическим параметрам (коэффициентам) CIPWD определить принадлежность породы к классификационным таксонам: отряду, группе, ряду, роду.

Практическое занятие № 12, 13

Тема: «Выбор систем, изобарических и изоплетических сечений, определение исходного расплава, прослеживание трендов кристаллизации и сопоставление их с реальными ассоциациями пород» 4 часа.

Цель занятий – определение степени владения полученными знаниями и навыками. По минимальному составу CIPWD изученных пород, из имеющейся в литературе диаграммы состояния, подобрать соответствующие элементы диаграмм, нанести на T-X сечения состава пород и по их расположению оценивается среднегеометрический состав, который принимается за исходный состав расплава. Прослеживается тренд кристаллизации и сопоставляется с реально установленной последовательностью образования изученных пород. В качестве фактического материала, требующего дальнейшей обработки, использованы выборки химических составов пород из различных полифазных дифференцированных комплексов Кольского региона и общая геологическая информация о положениях в разрезах проанализированных проб пород. В качестве инструментов исследования выступают таблица данных «*ProgrammaCIPWD.xls*» с встроенным макросом пересчета по алгоритму CIPWD, а также достаточное количество необходимых T-x диаграмм различной размерности (2-х, 3-х, 4-х компонентные), изотермические G-x сечения для недостающих T-x диаграмм или термодинамические данные для вывода диаграмм плавкости. В качестве конечного результата выступает отчет с физико-химической интерпретацией данных, включающий схемы теоретических путей кристаллизаций, составы исходных расплавов, направленность эволюции магматической системы во времени с обоснованным ответом на вопрос, какая последовательность внедрения в исследуемом комплексе – антидромная или гомодромная?

Практическое занятие №14

Тема: «Определение (оценка) физико-химических условий образования конкретных горных пород с применением диаграмм состояния и минералогических термометров и барометров» 2 часа.

По P_{H_2O} - T проекции и схеме кристаллизации выбранной диаграммы состояния и минеральному составу изученных пород оцениваются физико-химические условия кристаллизации. Эти данные сопоставляются и уточняются по минералогическим термометрам и барометрам, если имеются химические составы соответствующих минеральных пар.

Наиболее наглядно методики определения физико-химических условий образования конкретных горных пород с применением диаграмм состояния и минералогических термометров и барометров можно продемонстрировать на примере метаморфитов, для которых реконструкция термодинамических условий формирования является центральной задачей. Исследования, направленные на решение данной проблемы, ориентированы на: 1) определение пределов устойчивости фаз и ассоциаций в зависимости от а) P - T параметров и б) фугитивности летучих; 2) установление закономерности распределения компонентов между сосуществующими фазами, что позволяет использовать их в качестве геотермометров и геобарометров. Моделирование процессов метаморфизма основывается на применении к ним законов химического равновесия. Особое значение имеют реакции твердофазного превращения, в которых не участвуют летучие компоненты (графит – алмаз, кальцит – арагонит, полиморфные превращения кварца и силикатов глинозема и др.). Сложности – изменчивость минерального состава, большинство «удачных» реакций – в областях высоких давлений.

Учащимся предлагается рассчитать равновесные давления реакции образования жадеита (+ кварц) из альбита и полиморфного превращения графита в алмаз для ряда температур с несколькими заданными степенями приближения и вынести результаты на P - T диаграмму.

Петрологически важные реакции гидратации-дегидратации, карбонатизации-декарбонатизации. Равновесия минералов переменного состава. Наиболее значимы реакции изоморфизма: $Fe \leftarrow Mg$ в темноцветных $K \leftarrow Na$, в полевых шпатах и фельдшпатоидах, $Ca \leftarrow Na$ в плагиоклазах. Теория фазовых соответствий.

Обучающимся предлагается по данным химических анализов биотита и граната определить температуру равновесия этой пары при $P = 200$ и 600 МПа а) по диаграмме фазового соответствия, б) по уравнению Фэрри и Спэра и в) по уравнению Лаврентьевой и Перчука.

ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная:

1. Жариков В.А. Основы физико-химической петрологии. М.: Изд. МГУ, 1976 - 420 с.
2. Маракушев А.А. Метаморфическая петрология: Учебник/ А.А.Маракушев, А.В. Бобров.- М.: Изд-во Моск. Ун-та: Наука, 2005. – 256с.
3. Шинкарёв Н.ф., Иванников В.В. Физико-химическая петрология изверженных пород. 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Недра, 1983. – 271с.
4. Хардигов А.Э. Петрография и петрология магматических и метаморфических пород : учебник / А.Э. Хардигов, И.А. Холодная ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», Геолого-географический факультет. - Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2011. - 324 с. - ISBN 978-5-9275-0882-2 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=241098>.
5. Хэтч, Ф. Петрология магматических пород / Ф. Хэтч, А. Уэллс, М. Уэллс ; под ред. В.П. Петрова ; пер. с англ. П.П. Смолина. - Москва : Мир, 1975. - 511 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=481322>

Дополнительная:

6. Жариков, В. А. Основы физической геохимии : учебник / В. А. Жариков. — М. : Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2005. — 656 с. <http://www.iprbookshop.ru/13063.html>