

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет  
кафедра минералогии

**Д.Г. Коцуг, И.А. Екименкова**

**УЧЕБНО-НАУЧНАЯ ПРАКТИКА  
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано УМС геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова  
в качестве учебно-методического пособия для студентов,  
обучающихся по направлению «Геология»

Москва

2023

УДК 549

ББК 26.31

Рецензенты:

*Кафедра минералогии Геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова,*

*гл.н.с., профессор, чл.-корр. РАН И.В.Пеков*

*Институт экспериментальной минералогии им. акад. Д.С. Коржинского РАН (г.*

*Черноголовка), н.с., к.г.-м.н. Д.А. Ханин*

Кошуг Д.Г., Екименкова И.А.

Учебно-научная практика по экспериментальной минералогии: Учебно-методическое пособие (в электронном виде). МГУ имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, 2023. – 29 с.

В учебно-методическом пособии рассматриваются основные характеристики эндогенных процессов минералообразования, роль эксперимента в их изучении, параметры, которые можно моделировать в ходе экспериментальных работ. Особое внимание в пособии уделено оборудованию, с помощью которого осуществляются экспериментальные работы, а также кратко рассмотрено оборудование ИЭМ РАН, на базе которого осуществляется практика.

Для студентов направления «Геология», проходящих практику по экспериментальной минералогии.

УДК 549

ББК 26.31

## Содержание

Введение.....	4
Процессы минералообразования.....	6
• Магматические системы.....	7
• Метаморфические системы.....	11
• Метасоматические системы.....	15
Оборудование для экспериментальных исследований.....	17
Аналитическое оборудование общего и специального назначения.....	27
Список литературы.....	29

Учебно-научная практика по экспериментальной минералогии проходит в сентябре третьего семестра магистратуры в Институте экспериментальной минералогии им. акад. Д.С. Коржинского (ИЭМ) РАН в г. Черноголовка. Практику проходят студенты, обучающиеся по магистерским программам «Минералогия» и «Геммология». Целью практики является приобретение углубленных практических навыков и компетенций, необходимых для проведения научных исследований, а также закрепление и углубление теоретической подготовки, полученной в рамках учебных курсов, связанных с разными аспектами минералогии, кристаллографии, геохимии и петрологии. Задачами практики являются знакомство с организацией работы лабораторий ИЭМ РАН, ознакомление с приборной базой и методами исследования Института. Также в задачи, ставящиеся перед студентом, входит проведение экспериментальной работы на базе Института по теме, по возможности близкой к теме выпускной квалификационной работы. По результатам экспериментальных работ студентами пишется индивидуальный отчет, защита которого проходит на комиссии в ИЭМ РАН. Также студенту ставится оценка непосредственным руководителем практики в лаборатории. Форма отчетности – зачет. Продолжительность практики – две недели.

В ходе учебно-научной практики у студента формируются следующие компетенции:

- способность в процессе решения профессиональных задач самостоятельно получать, интерпретировать и обобщать результаты экспериментальных исследований;
- способность применять на практике знания фундаментального и прикладного характера, полученные ранее при освоении профильных дисциплин;
- способность к профессиональному использованию современного лабораторного оборудования.

Практика проходит на лабораторной базе ИЭМ РАН. Этот институт сочетает теоретические и экспериментальные исследования процессов минералообразования, направленные на решение фундаментальных проблем наук о Земле, выявление условий формирования и развития геосфер Земли и месторождений полезных ископаемых. Возможный круг направлений экспериментальных исследований определен тематикой работ ИЭМ РАН. В настоящее время в ИЭМ РАН научные исследования проводятся по следующим крупным направлениям:

- Физико-химические исследования состава и строения глубинных зон Земли с целью создания основ новых методов синтеза алмазов.

- Физико-химические проблемы магматизма и связанного с ним оруденения (термодинамические, структурные и физико-химические свойства расплавов, динамика магматических процессов, моделирование процессов рудогенеза).
- Физико-химические проблемы гидротермальных процессов (термодинамика водно-солевых и водно-газовых систем, минеральные равновесия с участием растворимых комплексов).
- Физико-химические проблемы метасоматизма и связанного с ним оруденения (теоретическое, экспериментальное и математическое моделирование процессов рудообразования и формирования месторождений полезных ископаемых).
- Физико-химические проблемы метаморфизма как основа познания развития Земли.
- Радиоэкологические исследования (с целью создания новых матриц и моделей захоронения высокоактивных отходов).
- Синтез и модифицирование минералов и горных пород (технология роста кристаллов, исследование кристаллофизических процессов для создания новых технологий и материалов).

В рамках этих направлений руководство РАН периодически (на некоторый период) утверждает тематику научных исследований, финансируемых государством. Институт имеет право проводить исследования и по другим темам, которые финансируются из иных источников (гранты, договора и др.). С 2022 года научные исследования в ИЭМ РАН, финансируемые государством, ведутся по следующим тематикам:

<b>Тематика</b>	<b>Руководитель</b>
Экспериментальное изучение вещества и процессов в мантии Земли	Д.г.-м.н. А.В. Спивак
Синтез, термодинамика и физика минералов и их синтетических аналогов	Д.г.-м.н. В.С. Балицкий
Экспериментальное и численное моделирование зарождения магм и флюидно-магматического взаимодействия в различных геодинамических обстановках	Д.г.-м.н. О.Г. Сафонов
Экспериментальное и теоретическое моделирование растворимости и форм переноса компонентов во флюидно-магматических и гидротермальных системах	Д.г.-м.н. В.Ю. Чевычелов

Все исследования сосредоточены в следующих научных лабораториях и подразделениях:

- Лаборатория мантии (зав. лаб. д.г.-м.н. А.В Спивак., в.н.с.)
- Лаборатория физико-химических проблем магматизма (зав. лаб. д.ф.-м.н. А.Г. Симакин)
- Лаборатория метаморфизма, магматизма и геодинамики литосферы (зав. лаб. к.г.-м.н. В.Г. Бутвина, с.н.с.)
- Лаборатория моделей рудных месторождений (зав. лаб. д.г.-м.н. В.Ю. Чевычелов, и.о. г.н.с. )
- Лаборатория гидротермальных процессов (зав. лаб. к.х.н. Л.З. Лакштанов, в.н.с.)
- Лаборатория электрохимии, термодинамики и физики минералов (зав. лаб. к.х.н. М.В. Воронин, с.н.с.)
- Лаборатория синтеза и модифицирования минералов (зав. лаб. к.х.н. Т.В. Сеткова, с.н.с.)
- Научное подразделение физических методов исследования вещества (зав. подр. к.х.н. А.А. Вирюс)
- Научно-организационное подразделение (руководитель д.г.-м.н., профессор РАН О.Г. Сафонов)

Главной задачей практики является ознакомление с методами экспериментального моделирования эндогенных процессов минералообразования на примере исследований, проводимых в ИЭМ РАН: от самых глубинных до близповерхностных гидротермальных.

Характеристики экспериментального оборудования, которое используется для моделирования природных процессов, зависят от предполагаемых параметров природных систем: температуры, давления и состава среды. Все экспериментальные системы в той или иной степени являются модельными, т.е. не во всем соответствующими природным (в первую очередь, по составу минералообразующей среды) системам.

### **Процессы минералообразования**

Первые специальные опыты, моделирующие процессы образования минералов в природе, были проведены около 200 лет назад, хотя выдающиеся мыслители понимали возможности эксперимента для познания природных процессов и значительно раньше.

Изучение природных объектов эндогенного происхождения и экспериментальные исследования идут параллельно, взаимно обогащая и контролируя друг друга. Познание эндогенных процессов базируется на геологических данных и на известных физико-химических принципах. Границы этапов и стадий процессов минералообразования в терминах физической химии определяются фазовыми равновесиями, т.е. появлением или

исчезновением какой-либо фазы (минерала, расплава или флюида). Минералогические и петрологические исследования опережают экспериментальные и ставят перед ними разнообразные задачи. Результаты экспериментов, в свою очередь, заставляют искать новые подходы к геологическим проблемам. На сегодняшний день все модели для процессов минералообразования обязательно включают экспериментальные данные.

Воссоздание эндогенных условий образования минералов в экспериментах проводится исходя из геологической классификации природных процессов. Рассматриваются магматические системы, метаморфические системы, метасоматические и гидротермальные процессы. Соответственно, рабочие диапазоны температуры и давления в экспериментах соответствуют традиционно принятым для данных природных систем. Эндогенные процессы протекают при относительно высоких температурах и давлениях. Температура кристаллизации магматических пород в зависимости от состава расплава колеблется от 1300 до 700°C, а давление – от 5500 до 500 бар (т.е. от 550 до 50 МПа). Связанное с магматизмом образование пегматитов, метасоматических пород, гидротермальных рудных тел происходит при значительно меньшей температуре и давлении. Так, температура гидротермального процесса может варьировать от 400 до 50°C, а давление – от практически атмосферного для вулканогенных гидротермальных образований до 150 МПа. Образование метаморфических пород охватывает практически все диапазоны физических условий, существующих в земной коре.

Рассмотрим подробнее возможности и результаты, получаемые в ходе экспериментальных исследований.

### **Магматические системы**

Экспериментальное изучение магматических пород проводится при ликвидусных или субликвидусных (между ликвидусом и солидусом) условиях, в которых может существовать расплав (магма). Системы, моделирующие магматические процессы в глубинах Земли, содержат также растворенные в магмах летучие и солевые компоненты, которые обычно не входят (или входят ограниченно) в состав горных пород – продуктов кристаллизации этих магм. Они фиксируются лишь частично, главным образом в гидроксилсодержащих минералах, а также в виде флюидных включений, захваченных минералами при их росте.

При экспериментальных исследованиях процессов изучаются фазовые отношения, т.е. условия стабильного сосуществования расплавов (магм) с твердыми фазами (минералами), тех и других с флюидом или двух несмешивающихся расплавов между собой; изменение фазовых отношений в зависимости от внешних условий; распределение

как порообразующих, так и примесных компонентов или изотопов между фазами; физические свойства фаз.

Исследуются:

- условия (температуры и давления) существования различных магматических расплавов и ассоциирующих с ними других фаз;
- причины разнообразия состава изверженных горных пород;
- механизмы дифференциации магм;
- закономерности эволюции состава магм при различных процессах дифференциации;
- механизмы зарождения магм и закономерности изменения состава расплавов, образующихся в различных условиях;
- связь магматизма с гидротермальной деятельностью и рудообразованием;
- взаимодействие магматических расплавов с вмещающими породами.

Эксперименты в "сухих" (без летучих компонентов) системах позволили разработать теорию эволюции изверженных пород. Минимальная температура существования расплава в большинстве систем - эвтектическая, а состав эвтектики - предел изменения состава системы по этому механизму. Соответственно, при повышении температуры пределом сосуществования расплава с кристаллами (температурным максимумом) является конгруэнтное плавление самых тугоплавких кристаллических фаз, а состав последних лимитирует изменение состава системы при повышении температуры. Температурные минимумы и максимумы ликвидуса являются естественными барьерами, дальше которых изменение состава системы в связи как с кристаллизацией, так и с плавлением принципиально невозможно.

Многие эмпирически установленные особенности геохимии (концентрации или рассеяния) редких элементов в магматических сериях находят объяснение в их фракционировании в ходе кристаллизационной дифференциации. В основе таких моделей лежат экспериментальные данные о последовательности кристаллизации минералов из магмы и о коэффициентах разделения редких элементов между расплавом и выделяющимися минералами. Так, принято выделять совместимые элементы, которые преимущественно входят в твердую фазу, и несовместимые, которые накапливаются в расплаве по мере кристаллизации.

Фракционная кристаллизация объясняет очень многие особенности петрохимической и геохимической эволюции природных магматических серий. Однако уже столетие назад исследователи находили противоречия между этой стройной концепцией и наблюдаемыми в природе фактами. Наиболее очевидной причиной такого

несоответствия является рассмотрение процессов кристаллизации только при атмосферном давлении, хотя геологические и геофизические данные указывают на связь состава магм и характера их кристаллизации с глубиной зарождения или становления.

С середины прошлого века в качестве весьма эффективного механизма дифференциации магмы предлагалась ликвация, т.е. расщепление магмы на несмешивающиеся жидкости. Проведенные в последние десятилетия экспериментальные исследования разнообразных силикатных систем подтвердили существование ликвации в магмах при геологически реальных составах и температурах. Согласно наблюдениям над природными объектами, ликвация чаще всего приводит к образованию сосуществующих силикатного щелочноалюмосиликатного и мафического расплава, обогащенного Fe, Mg, Ca и Ti. Экспериментальные исследования показали, что появление разрывов смесимости жидкостей часто связано с относительно небольшими добавками в обычные алюмосиликатные системы таких компонентов как F, B, CO<sub>2</sub>, Fe, Ti, P, S. Это позволяет предполагать, что если температуру ликвидуса понизить путем добавки дополнительных компонентов, то можно будет обнаружить разрывы смесимости в ряде важных систем.

Расслоение расплавов часто наблюдается при изучении расплавных включений в минералах. Во включениях основного состава нередко наблюдаются сульфидные глобулы в силикатной матрице. Помимо сульфидно-силикатной, наблюдается, хотя и реже, оксидно-силикатная, карбонатно-силикатная и силикатно-силикатная несмесимость.

Поведение как главных породообразующих, так и второстепенных элементов при фракционной кристаллизации и в случае ликвационных отношений часто существенно различается.

Важным моментом для понимания магматических процессов является несоответствие состава расплавов и кристаллизующихся из них горных пород. В первую очередь несоответствие касается летучих компонентов, в особенности воды. Об участии этих компонентов в магматических процессах свидетельствуют выделение газов и взрывные явления при извержениях, кристаллизация из магм минералов, содержащих в своем составе летучие компоненты, наличие флюидных включений (наряду с расплавными) в минералах и стекле магматических пород.

Экспериментальное изучение поведения летучих компонентов в расплавах способствовало решению сразу нескольких фундаментальных проблем. Величина растворимости воды в некоторых силикатных расплавах достигает 9-12 мас.%. Это очень большая величина. В связи с низким значением молекулярной массы максимальное содержание воды, выраженное в молекулярных процентах, превышает 50%. В магме, порождающей интрузии протяженностью до десятков километров и мощностью в

несколько километров при такой концентрации растворено достаточно воды, чтобы обеспечить всю связанную с ними послемагматическую гидротермальную деятельность. После кристаллизации вода и другие летучие компоненты дают начало гидротермальным растворам, с которыми связано образование руд и метасоматические изменения вмещающих пород.

Растворимость воды в расплавах сильно увеличивается с ростом давления, влияние же температуры незначительно.

Растворимость в расплавах других летучих компонентов заметно ниже, чем воды. Для углекислоты она колеблется от 0.5 до 4 мас.% (1 - 8 мол.%), для инертных газов, азота, кислорода и водорода - еще ниже.

Определение растворимости воды позволяет утверждать, что она не беспредельна, а, следовательно, существует естественная граница между расплавами и водными растворами. Следствием ограниченной растворимости является отделение от магмы флюида при понижении температуры. При кристаллизации силикатных расплавов летучие компоненты практически не входят в состав образующихся минералов и накапливаются в остаточном расплаве, а при достижении предела насыщения отделяются от него в виде самостоятельной флюидной фазы. Это важнейшая часть кристаллизационной дифференциации. Именно флюидная фаза обеспечивает все постмагматические процессы, а в дальнейшем она дает начало послемагматическим гидротермальным растворам.

Прямое определение состава магмы и условий кристаллизации расплавов стало возможным в результате развития методов изучения расплавных включений в минералах. В термометрических экспериментах, проводимых с расплавными включениями, непосредственно наблюдают за фазовыми превращениями, происходящими внутри включения.

Еще одним результатом растворения летучих компонентов в расплаве является существенное понижение температуры плавления, измеряемое десятками градусов на килобар. Понижение температуры плавления наиболее значительно (до 200°C на 1 килобар давления воды) для гранитов и нефелиновых сиенитов.

Несоответствие состава магм и образующихся из них горных пород в отношении воды и других летучих компонентов стало открытием. То же самое касается солевых (галоидных, карбонатных и др.) и сульфидных составляющих магм. Как и летучие компоненты, они в большинстве своем почти не входят в состав минералов и по мере кристаллизации накапливаются в остаточном расплаве. Их накопление не беспредельно, оно лимитируется ограниченной растворимостью, по достижении которой отделяется плотная водно-солевая жидкость ("флюидный расплав"). Растворимость солевых

компонентов в алюмосиликатных расплавах измеряется во многих случаях десятими долями процента и обычно не превышает первых процентов, поэтому на самых поздних стадиях кристаллизации такое отделение неизбежно.

Большое значение имеет характер солевой составляющей. Появление расплавов, в составе которых все три (силикатная, солевая и водная) составляющие входят в соизмеримом количестве, экспериментально были обнаружены в системах сложного состава. В геологической литературе их называют расплавами-растворами, расплавами-рассолами, флюидными расплавами, в случае малого содержания силикатной составляющей - тяжелым флюидом.

Особенности рассматриваемых силикатно-солевых систем имеют большое значение для решения одной из самых важных проблем эндогенной геологии - связи оруденения с интрузиями. Сегодня общепризнано, что не нужно искать источник рудного вещества для магматогенных месторождений, путь решения проблемы состоит в нахождении эффективного механизма его накопления, т.е. изучении распределения рудных компонентов в возможных фазовых равновесиях магматической стадии.

Равновесия с участием флюидных расплавов наиболее перспективны для осуществления концентрирования рудного вещества на магматической стадии и реализации механизма рудной специализации магм. Решение проблемы не завершено. Тем не менее, известно, что солевые расплавы способны растворять значительное количество рудных минералов. Экспериментально установлено, что в равновесии магма/флюидный расплав многие компоненты концентрируются в последнем. Показательным примером может служить литий во фторсодержащей гранитной системе. Поведение вольфрама в той же системе иллюстрирует зависимость от особенностей ее состава. Вольфрам эффективно концентрируется в алюмофторидном флюидном расплаве только в случае преобладания калия над натрием, что согласуется с вольфрамоносностью исключительно обогащенных калием гранитов. Свинец и цинк концентрируются во флюидном расплаве в системе с хлоридами, в отличие от фторсодержащей.

### **Метаморфические системы**

В учении о метаморфизме одной из главных проблем всегда была реконструкция термодинамических условий образования и эволюции метаморфических пород, основанная на выделении минеральных фаций, т.е. парагенезисов минералов, образовавшихся в сходных условиях температуры и давления. Границы фаций выделяются по фазовым превращениям минералов и минеральным реакциям, в том числе и с участием флюидной

фазы, поэтому основной целью экспериментальных исследований проблем метаморфизма является определение термодинамических параметров минеральных равновесий.

Экспериментальные исследования, важные для решения проблем метаморфизма, относятся к субсолидусной области алюмосиликатных, силикатных и ряда карбонатных систем. Важнейшие вопросы, которые рассматриваются в таких исследованиях:

- определение пределов устойчивости метаморфических минералов и минеральных ассоциаций в зависимости от температуры и давления, активности (летучести или фугитивности) воды, углекислоты, кислорода и некоторых других компонентов;
- установление закономерностей распределения компонентов (и изотопов) между сосуществующими минералами, которые используются в качестве минеральных термометров и барометров;
- изучение влияния внешних условий на особенности структуры минералов и распределение компонентов по неэквивалентным кристаллохимическим позициям.

Моделирование процессов метаморфизма основывается на приложении к ним законов химического равновесия. Анализ минеральных ассоциаций с точки зрения правила фаз показал, что при метаморфизме достижение химического равновесия в первом приближении довольно обычно. Особенно убедительна независимость конечного состояния от предыстории процесса. Например, при метаморфизме пород, имеющих одинаковый химический состав - магматических, с одной стороны, и осадочных - с другой, образуются неотличимые друг от друга породы. Установление соответственно орто- или пара- природы метаморфитов, как правило, представляет сложную проблему. Вместе с тем в метаморфических породах широко распространены реакционные структуры и зональность зерен, позволяющие выявить несколько наложившихся друг на друга стадий минералообразования, связанных с изменением внешних условий. Поэтому можно говорить лишь о квазиравновесности метаморфических процессов.

Механизмы действия флюида (и прежде всего воды) разнообразны. Его растворяющее действие приводит к разрушению исходных минералов, значительно увеличивая число реакционноспособных частиц. Водные флюиды способствуют транспортировке вещества, увеличивая на несколько порядков скорость диффузии; кроме того, перенос вещества может осуществляться и потоком флюида. В присутствии флюида гораздо легче, чем в твердой фазе, идет образование зародышей новых кристаллических фаз. Наконец, по представлениям многих исследователей, потоки флюидов в земной коре - главные переносчики тепла, подводящие его к зонам метаморфизма.

В экспериментальных исследованиях рассматривают твердофазовые реакции минералов постоянного состава, равновесия минералов постоянного состава с участием летучих компонентов, равновесия минералов переменного состава.

Твердофазовые реакции минералов постоянного состава – минеральные равновесия, в которых не участвуют летучие компоненты, имеют особое значение. Эти равновесия не зависят от химизма среды, определяющими являются температура или давление. К рассматриваемым равновесиям относятся полиморфные переходы, например, алмаз-графит, кальцит-арагонит, превращение оливина в шпинелеподобную модификацию, равновесия между полиморфными модификациями кремнезема и силикатами глинозема. Изучение подобных равновесий представляет значительные экспериментальные трудности из-за очень низкой скорости реакции (при этом возникает вопрос и о равновесности парагенезисов этих минералов в природных условиях).

Равновесие минералов постоянного состава с участием летучих компонентов. Увеличение температуры при метаморфизме вызывает прогрессивное уменьшение воды, входящей в структуру кристаллических фаз, и соответственно, смену хлорита биотитом, мусковита калиевым полевым шпатом, амфиболов пироксенами и т.п. Поглощение или освобождение воды в подобных реакциях сопровождается значительным энтропийным эффектом, вследствие чего они существенно зависят от температуры.

Второй по значению компонент метаморфизирующего флюида - углекислота. Реакции с поглощением и выделением углекислоты особенно важны для минералообразования в карбонатных породах, содержащих примеси кремнезема и глинозема, в контактах интрузий с известняками и доломитами, в магнезиальных скарнах и ультраосновных породах.

Коэффициент летучести воды мало зависит от глубинности. По-другому ведет себя углекислота. Коэффициент ее летучести значительно возрастает с глубиной, благодаря чему с увеличением глубинности происходит последовательная карбонатизация минералов, богатых кальцием, а также ряда магниевых минералов.

Существенный момент экспериментального моделирования процессов метаморфизма - учет поведения кислорода. Его влияние сказывается на реакциях с участием элементов переменной валентности и на степени восстановленности флюида. Петрологические данные показывают, что в условиях земной коры в целом господствуют существенно более восстановительные условия, чем на поверхности Земли, и, соответственно, летучесть кислорода уменьшается с увеличением глубинности.

Равновесия минералов переменного состава. Метаморфические породы сложены преимущественно минералами переменного состава. Наибольшее значение имеет изоморфизм магния и железа в различных темноцветных минералах, калия и натрия в

полевых шпатах и фельдшпатоидах, натрия и кальция в плагиоклазах. Существуют и многие другие типы изоморфных замещений в твердых растворах минералов.

Равновесия с минералами - твердыми растворами значительно сложнее, чем с фазами постоянного состава, однако их использование открывает новые возможности. К относительно простым реакциям этого типа относится распад твердых растворов при понижении температуры.

При одинаковом типе изоморфизма двух сосуществующих минералов равновесие может быть двух типов – обменным и смещенным. В первом случае происходит обмен компонентами между фазами, во втором - рост содержания компонента в одной из фаз. Обменные равновесия почти не зависят от давления (их объемный эффект близок к нулю), в то время как смещенные равновесия - наоборот, меньше зависят от температуры (имеют меньший энтропийный эффект при заметном объемном). Первые используются как геологические термометры, вторые – чаще как геобарометры.

Определение состава метаморфического флюида, т.е. соотношения парциального давления (летучести) важнейших составных частей: воды, углекислоты и кислорода - проводится по реакциям гидратации, карбонатизации и окисления, соответственно. Это является важнейшим аспектом учения о метаморфизме, наряду с проблемой минеральных фаций. Непосредственное приложение имеют обменные равновесия с флюидом таких минералов, как слюды, амфиболы, апатит, в структуре которых осуществляется изоморфизм гидроксил-иона с фтором и хлором. Экспериментально изучены некоторые смещенные равновесия. Так, в значительном интервале условий можно оценивать летучесть кислорода равновесия биотита, ассоциирующего с магнетитом, и титаномагнетита - с ильменитом. Для оценки режима углекислоты в доломитовых мраморах применимы данные по изменению состава Mg-содержащего кальцита в равновесии с доломитом и периклазом.

В последние годы экспериментаторы активно исследуют распределение анионов между минералами и равновесным флюидом. Были изучено распределение анион - флюид следующих минералов: апатит (Cl, F), скаполит (C, S), содалит (Cl, S), биотит (F, OH).

При кристаллизации минералов горной породой часто захватываются микроскопические порции минералообразующих сред, называемые флюидными включениями. Исследование флюидных включений из метаморфических пород преследует две основные задачи: оценку состава минералообразующего флюида при метаморфическом процессе и оценку P-T- параметров процесса.

## Метасоматические системы

Метасоматиты образуются при взаимодействии контрастных горных пород между собой или горных пород с агрессивным раствором (расплавом). Так же, как при метаморфизме, в течение всего процесса сохраняется твердое состояние породы, но при этом изменяется ее химический состав, происходит привнос и вынос вещества. Соответственно, пределы изменения состава метасоматитов шире, чем метаморфических горных пород.

История изучения метасоматитов, процессов их образования и экспериментального моделирования необычна и резко отличается от истории изучения магматизма и метаморфизма. Уже работы середины XIX века, в которых исследовалось воздействие пара на стекла и другие твердые вещества, по существу, воспроизводили метасоматические процессы. Однако научный подход стал возможен только начиная с 1950-х годов после создания Д.С. Коржинским физико-химической теории метасоматизма (метасоматоза). Согласно теории, для этих процессов характерны следующие особенности:

- обязательным результатом метасоматоза является возникновение правильной зональности (метасоматической колонки);
- разрастание нескольких метасоматических зон происходит одновременно;
- при неравновесности процесса в целом в каждой точке колонки достигается локальное равновесие;
- на границах зон образуются резкие фронты замещения, на каждом из которых один из минералов породы полностью исчезает;
- по мере возрастания интенсивности метасоматического преобразования исходной породы число фаз (минералов) в зонах уменьшается;
- при разрастании метасоматической зональности состав зон остается постоянным.

Группа специфических проблем связана с неравновесностью метасоматического процесса в целом (при установлении локального равновесия в каждой точке возникающей зональности) и необходимостью получения его динамических характеристик. Остается задача определения температуры и давления образования, но еще более актуальным становится реконструкция состава воздействующего флюида. Последнее особенно важно для понимания связи метасоматизма и рудообразования.

В работе по экспериментальному изучению метасоматоза выработаны два подхода: исследование отдельных равновесий и моделирование процесса в целом. Первый подход принципиально сходен с изучением метаморфических реакций. Второй подход основан на непосредственном воспроизведении всего метасоматического процесса и получении

зональности - колонки одновременно образующихся зон. Он обладает несомненными преимуществами в отношении возможностей получения динамических и кинетических характеристик и потому особенно важен. Оба подхода взаимно дополняют друг друга и часто используются совместно.

Для экспериментального моделирования наибольшее значение имеют следующие три типа взаимодействия при метасоматозе:

- 1) Простой околотрещинный диффузионный метасоматоз. Процесс моделируется простейшим способом: измельченная горная порода, плотно набитая в открытую с одного конца пробирку из платины или золота, приводится в соприкосновение с большим объемом воздействующего раствора.
- 2) Биметасоматоз (встречная диффузия компонентов в неподвижных поровых растворах двух контактирующих пород, контрастных по химическому составу). В таких опытах нижняя часть пробирки заполняется одной породой, а верхняя - другой, контакт маркируется меткой из платиновой проволоки.
- 3) Инфильтрационный метасоматоз происходит при фильтрации изначально неравновесного флюида сквозь достаточно проницаемую породу. Его моделирование требует более сложного, специально разработанного оборудования.

Как для инфильтрационного, так и для диффузионного метасоматоза выделяются процессы кислотной и щелочной направленности. В первых из них происходит растворение и вынос из пород оснований, начиная с самых сильных. Оно компенсируется отложением кислотных компонентов, из которых в силикатных породах наибольшее значение имеет кремнезем. Щелочной метасоматоз характеризуется противоположными тенденциями. В этом отношении биметасоматическое взаимодействие двух пород имеет две разных направленности - по отношению к одной основную (в химическом смысле), а к другой - кислотную направленность.

Экспериментальные исследования позволяют определить численные значения динамических и кинетических величин. Целый ряд особенностей не мог быть ни предсказан теоретически, ни выведен из геологических наблюдений, часть из них оказались неожиданными. Никаким другим путем не могла быть сделана оценка продолжительности формирования метасоматических тел. Принципиальную новизну имеют установленные факты влияния анионного состава раствора на соотношение мощности зон колонки, а иногда и на саму последовательность ее зон. Здесь, по-видимому, нужно искать путь к пониманию связи метасоматитов и оруденения - важнейшей проблемы, пока почти не затронутой экспериментальными исследованиями.

Известно, что одни и те же метасоматиты, на первый взгляд неотличимые друг от друга, сопровождаются разными типами оруденения. Примером могут служить образование сходных березитов в связи с золотыми, полиметаллическими или урановыми рудами. Можно предполагать, что специализация на разные типы оруденения связана с различиями анионного состава растворов, который находит отражение и в некоторых второстепенных особенностях метасоматитов, таких как соотношение мощности зон колонки, изменение тонких особенностей состава отдельных минералов и др.

Моделирование позволяет на количественной основе определить границы фаций метасоматитов, т.е. пределы интенсивных параметров, при которых формируется определенный тип зональности. Наибольшее значение имеют температура, кислотность и активность компонентов раствора. Флюидное давление играет второстепенную роль, поскольку его изменение в пределах диапазона 0.5-2 кбар, наиболее характерного для гидротермального минералообразования, принципиально не сказывается на условиях стабильности породообразующих минералов. Существенное влияние на вид возникающих колонок оказывает состав исходных пород.

Совокупность фаций метасоматитов, образующихся в одном характерном и повторяющемся в земной коре петрогенетическом процессе, обозначается как метасоматическая формация. Это чисто геологическое понятие. Экспериментальные исследования показывают, что эмпирически сложившееся выделение формаций не является случайным, каждой из них отвечает относительно узкий интервал физико-химических условий образования.

### **Оборудование для экспериментальных исследований**

Для экспериментального исследования процессов образования или преобразования минералов используется специальное оборудование. Его описание составлено во многом по материалам учебника по экспериментальной и технической петрологии (Граменицкий и др., 2000, <https://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1164637&uri=index.html>).

Классификация наиболее широко используемых в экспериментальной и технической петрологии аппаратов основана на двух принципах. Прежде всего, различают установки с внешним и с внутренним нагревом. В первом типе нагреватель работает при атмосферном давлении, во втором - находится под рабочим давлением опыта. Другой принцип классификации - по передающей давлению (компримируемой) среде: жидкой, газовой или твердой.

Предельно схематизированные разрезы наиболее распространенных аппаратов приведены на рис.1:

А. Простейшими аппаратами являются печи для экспериментов при атмосферном или более низком (в условиях вакуума) давлении. Формально они могут быть отнесены к аппаратам с газовой передающей давлением средой и с внутренним нагревом, поскольку нагреватель находится под тем же давлением, что и вещество опыта.

Б. Автоклавы – герметичные сосуды, заполненные водой или иной жидкостью с известными теплофизическими свойствами, за счет разогрева которой в постоянном объеме создается требуемое давление. Они разогреваются в печи, нагреватель которой находится под атмосферным давлением.

В. Экзоклавы отличаются от автоклавов тем, что давление в процессе опыта можно регулировать нагнетанием компримируемой жидкости извне.

Способ создания давления в автоклавах и экзоклавах различается: в первых давление задается за счет расширения рабочего тела при нагреве, во вторых - давление задается извне, независимо от температуры опытов. В экзоклавах достигаются более высокие температуры и давления, чем в автоклавах благодаря тому, что затвор в них выведен в холодную зону.

Г. Газовые бомбы (газостаты) с внутренним нагревом. Холодные стенки бомбы подвергаются действию только давления, а стенки контейнера (ампулы) с веществом опыта - только температуры (давление внутри и вокруг него одинаково).

Д. Твердофазовые установки с внутренним нагревом. Давление создается сжимающим усилием гидравлического пресса (показано стрелками). Нарисован только один тип – установка типа "цилиндр-поршень".

Е. Один из типов многоступенчатой установки. Образец сжимается по граням куба шестью поршнями, образующими вместе разрезную сферу. Последний помещается в резервуар с маслом, которое сжимается насосом. Максимальное давление достигается во внутренней камере, а стенки каждой из них выдерживают лишь разность давлений.

Для достижения очень высокого давления применяется твердая передающая

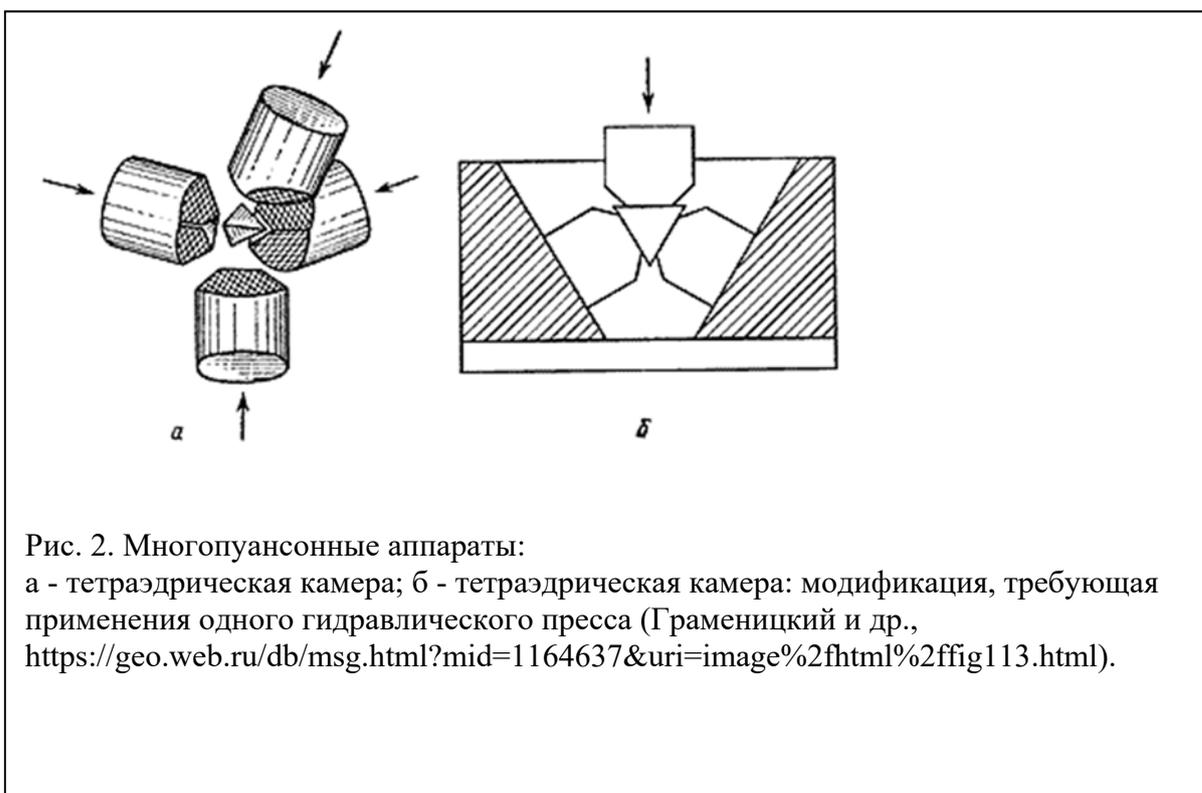


давление среда, в качестве которой для создания *квазигидростатического* распределения напряжения используются материалы с низким коэффициентом внутреннего трения: пирофиллит, тальк, хлорид серебра, нитрид бора, для низких температур - фторопласт. Постепенно вытекая через зазоры, эти материалы одновременно создают отличное уплотнение полости высокого давления.

Простейший твердофазный аппарат – **наковальня Бриджмена**. Образец устанавливается между двумя поршнями (пуансонами) по их оси и окружается кольцевой прокладкой. При сближении поршней, на которые действует усилие мощного гидравлического прессы, прокладка сминается и начинает выдавливаться из зазора между наковальнями. Силы трения в ней на контактах с наковальней уравнивают созданное давление. При этом устанавливается радиальный градиент давления, максимальный в центре и резко убывающий до атмосферного в нижней части прокладки.

Из-за необходимости улучшить параметры аппаратов (увеличить предельное давление, увеличить объем камеры и др.) были разработаны другие конструкции: **«наковальня с лункой»**, или камера типа **«чечевица»**, **«белт»**.

Предельная величина давления в камерах типа цилиндр - поршень и "белт" лимитируется прежде всего необходимостью поддержки растягивающих напряжений в цилиндрической камере. Поэтому другой важный конструкционный принцип – замена растягивающих напряжений сжимающими. На этом принципе были созданы камеры, стенками которых служат симметрично расположенные в пространстве и упрочненные поршни. Самым простым симметричным расположением является система из двух соосных поршней (наковальни Бриджмена, белт-аппарат и др.). Последовательное применение принципа осуществлено на многопуансонных аппаратах, поршни которых располагаются по граням правильных многогранников (тетраэдра, куба, октаэдра, рис. 2). Равномерное сдвигание поршней осуществляется синхронно работающими несколькими гидравлическими прессами или может быть осуществлено одним прессом. Многопуансонные аппараты позволяют достичь давления 100 кбар. Одновременно увеличивается объем рабочей камеры (до 0.4 л), давление становится более гидростатичным, т.е. снижаются градиенты давления.



Принципиально иной путь увеличения рабочего давления – это создание многоступенчатых аппаратов, состоящих из нескольких камер высокого давления, помещенных одна в другую (принцип "матрешки"). Максимальное давление достигается во

внутренней камере, а стенки цилиндров и поршни испытывают лишь разность давлений. На двухступенчатом аппарате цилиндр – поршень достигнуто давление 100 кбар.

Специфическая аппаратура, обеспечивающая возможность измерений в процессе опытов (*in situ*), обычно создается для задачи изучения состояния вещества непосредственно в условиях эксперимента. Благодаря использованию специальных окон в реакторах, прозрачных для соответствующего излучения, удается снимать рентгенограммы, получать спектры поглощения, комбинационного рассеяния и др. Введение через стенки реакционной камеры электровводов позволяет следить за изменением электропроводности и определять рН среды.

В ИЭМ РАН большая часть оборудования для проведения опытов предназначена для коллективного использования. Можно отметить следующее оборудование.

### **Сосуды высокого газового давления (СВГД)**

СВГД-7. Внутренний диаметр камеры – 50 мм, рабочая длина 330 мм. Давление рабочее <6 кбар создается аргоном. Температура рабочая <1300°C. Для проведения управления и проведения контрольных измерений предусмотрено 12 электровводов. Имеется система наклона СВГД.

СВГД-13. Внутренний диаметр камеры – 40 мм, рабочая длина 320 мм. Давление рабочее <7.5 кбар создается аргоном. Температура рабочая <1250°C. Для проведения управления и проведения контрольных измерений предусмотрено 6 электровводов. Имеется система наклона СВГД.

### **Твердофазная аппаратура высокого давления**

*Аппараты высокого давления тороидального типа "наковальня с лункой".*

Два аппарата высокого твердофазного давления системы "цилиндр-поршень" (ЦП) (End-loaded piston-cylinder apparatus). Диаметр рабочих камер 1/2 и 3/4 дюйма. Ячейки из NaCl и талька с графитовыми нагревателями. Давление 6 – 30 кбар, температура до 1400 С (в специальных конструкциях ячеек до 1500 С).

Графитовый нагреватель. Температура 1000–2000 С, давление 5-10 ГПа.

*Комплекс аппаратуры высокого давления с алмазными наковальнями и лазерным нагревом:*

P=10-60 ГПа и t=1500-3000°C,

лазер SPI Lasers (1064 нм, 50 и 100 Вт), лазерная головка UniHead на базе лазерной головы FCS производства Precitec KG (Германия),

цифровая камера GigE uEye (SUXGA, 2048x1536),

спектрометр QE65000 Ocean Optics.

### *Гидротермальные установки высокого давления:*

внешний нагрев и холодный затвор, вертикальное расположение, среда компримирования – вода,

внутренний диаметр 10 мм, 6 мм; высота 200 мм и 150 мм,

рабочие параметры:  $T \leq 700$  С;  $P \leq 400$  МПа.

### **Автоклавное оборудование**

Печи резистивные, цилиндрические, для автоклавов, с регулируемым градиентом температуры, максимальная температура 750 С. Размеры рабочего цилиндра:

- диаметр 170мм, высота 500мм,
- диаметр 175мм, высота 600мм,
- диаметр 175мм, высота 420мм,
- диаметр 120мм, высота 550мм,
- диаметр 120мм, высота 500мм.

### **Оборудование для синтеза аналогов минералов**

Методов синтеза кристаллов существует много. Для подробного ознакомления с различными методами можно обратиться к учебным пособиям (Мурашкевич, Жарский, 2010; Леонюк и др., 2014, 2017).

Методы синтеза кристаллов можно разделить на три основные группы по типу среды, в которой происходит синтез: а) выращивание из стехиометрического расплава, б) выращивание из раствора, в) выращивание из газовой фазы. Вначале необходимо создать условия, при которых начнется процесс кристаллизации, а затем управлять процессом кристаллизации подбором параметров среды. При кристаллизации из расплава процессом управляют путем подбора температуры. При кристаллизации из раствора контролирующим параметром является концентрация вещества, а при синтезе из газовой фазы основным параметром является давление.

Выращивание из расплава широко используется для получения функциональных, промышленно важных кристаллов. Методы Киропулоса, Чохральского, Стокбаргера, Бриджмена, Степанова и Багдасарова позволяют работать с большим объемом расплава, а методы Вернейля и зонной плавки – с малым объемом расплава. Кристаллизация собственного (однокомпонентного) расплава начинается в результате небольшого переохлаждения ниже температуры плавления вещества. Например, к поверхности расплава подводят затравку (причем не обязательно из того же вещества) и на ней начинается кристаллизация, так как температура затравки ниже. Затем затравку медленно поднимают со скоростью роста кристалла. Фронт кристаллизации расплава определяется

размером и положением затравки, либо распространяется от затравки к краям тигля, если затравку не поднимать. На рис. 3 приведена схема метода выращивания кристаллов по Чохральскому.

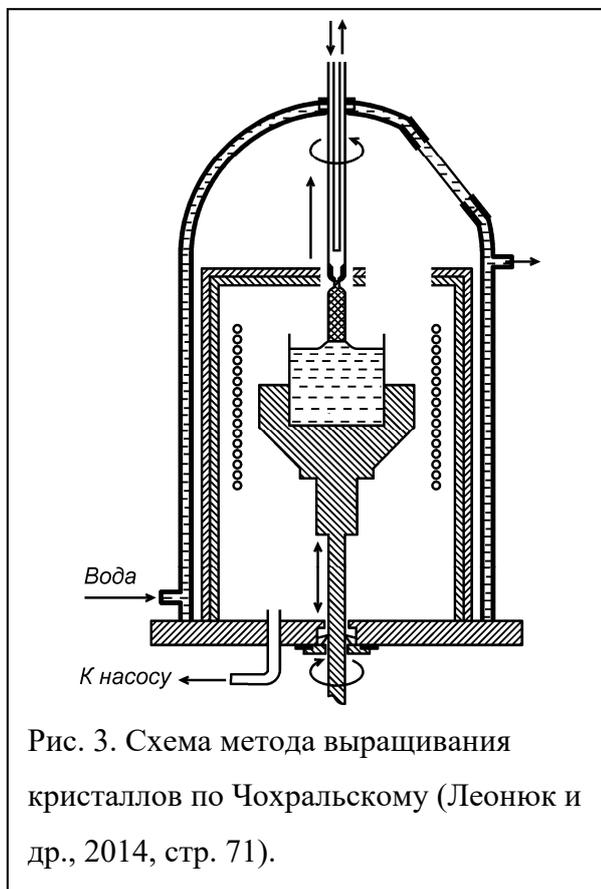


Рис. 3. Схема метода выращивания кристаллов по Чохральскому (Леонюк и др., 2014, стр. 71).

Технически более простыми являются методы направленной кристаллизации, когда происходит кристаллизация всего расплава. Расплав находится в контейнере, например, в виде ампулы с конусообразным дном, где и начинается кристаллизация в результате охлаждения вершины конуса. Фронт кристаллизации движется от одного конца контейнера к другому. В этом случае размер и форма кристалла зависят от используемого контейнера.

***Выращивание кристаллов из растворов, в том числе из раствора в расплаве.***

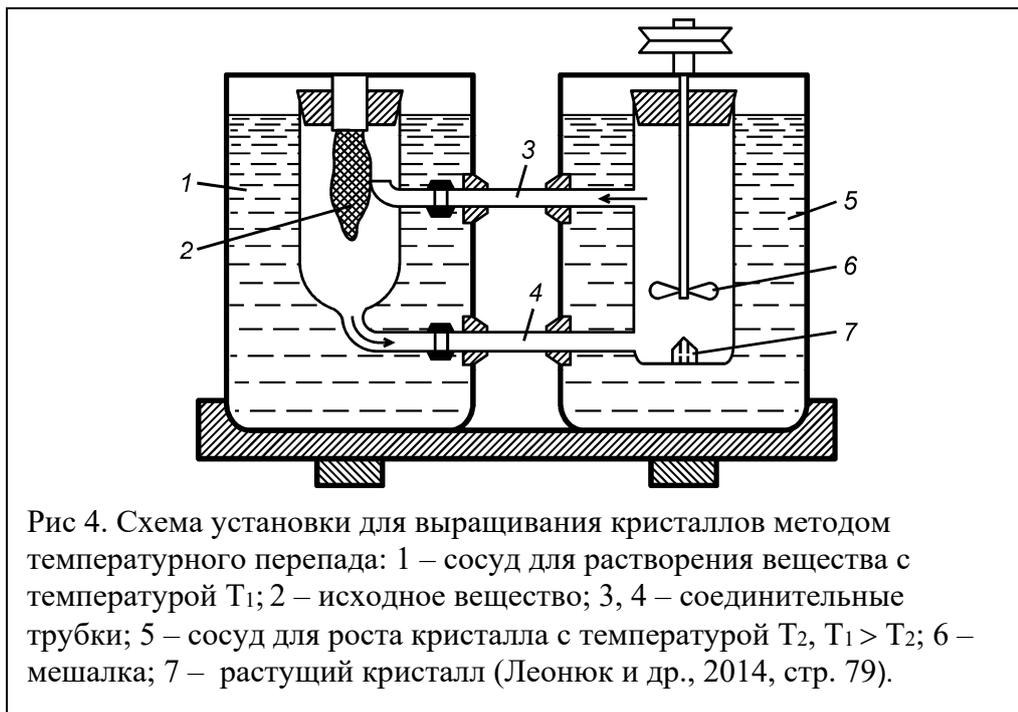
Среда, в которой происходит выращивание из растворов, состоит из растворителя (возможно с некоторыми добавками) и растворенного соединения, которое будет кристаллизоваться. В качестве растворителя могут использоваться вода, многокомпонентные водные и неводные растворы, включая расплавы ряда соединений. В зависимости от температуры среды выделяют низкотемпературные растворы (водные);

высокотемпературные (раствор-расплавная кристаллизация); перегретые водные (т.н. гидротермальный синтез).

Все вещества обладают некоторой равновесной растворимостью в той или иной среде. Обычно с ростом температуры растворимость растет. При каждой температуре существует равновесная концентрация растворенного вещества. Чтобы запустить процесс кристаллизации растворенного вещества, надо достичь равновесной концентрации и затем создать пересыщение.

По принципу создания пересыщения способы кристаллизации из раствора разделяются на несколько групп. 1. Кристаллизация за счет изменения температуры раствора. Сюда относятся методы кристаллизации, связанные с перепадом температуры в растворе, а также кристаллизация в изотермическом объеме при общем снижении или подъеме температуры. 2. Кристаллизация за счет изменения состава раствора (испарение растворителя). 3. Кристаллизация в результате химической реакции.

В случае изменения температуры раствора в сосудах для выращивания есть две зоны: зона растворения шихты и зона кристаллизации. Температура зоны растворения несколько выше, чем температура зоны кристаллизации. Раствор с повышенной концентрацией растворенного вещества в результате естественной или вынужденной конвекции подается из зоны растворения в зону кристаллизации, в которой возникает пересыщение и начинается процесс кристаллизации. Нередко в зоне кристаллизации располагают монокристаллическую затравку из выращиваемого соединения. На рис. 4 приведена схема метода выращивания кристаллов методом температурного перепада.



Не все вещества растворимы в воде, поэтому для синтеза применяется и метод кристаллизации из раствора в расплаве, т.е. кристаллизация из двух- или многокомпонентного расплава. Для этого метода очень важно знать физико-химическую диаграмму состояний соответствующей системы. Раствор-расплавная кристаллизация в определенной степени моделирует кристаллизацию магматических расплавов.

Особенностью метода раствор-расплавной кристаллизации является использование расплавов легкоплавких солей, оксидов и их смесей в качестве растворителя. Методы кристаллизации из раствора в расплаве можно разделить на две группы: спонтанная кристаллизация и кристаллизация на затравку. В первом случае длительность синтеза невелика, однако качество получаемых кристаллов невысокое. Кристаллизация на затравку реализуется в нескольких вариантах и позволяет получить достаточно совершенные кристаллы.

Следует упомянуть, что раствор-расплавная кристаллизация используется для выращивания эпитаксиальных пленок и нитевидных кристаллов. Этот метод получил название *жидкофазной эпитаксии*.

Метод выращивания из газовой (паровой) фазы заключается в том, что в одной части системы (ампулы) при высокой температуре происходит испарение синтезируемого вещества. За счет градиента температуры пар переносится в более холодную часть системы, где и происходит кристаллизация.

Гидротермальный синтез минералов обычно проводят в автоклавах, изготовленных из специальной жаропрочной стали или титана. Титановые автоклавы обычно используются до 500 С и давления 150 МПа, а жаропрочные из Cr-Ni сплава до 800 С и давления 200 МПа. Для защиты стенок автоклава от химического воздействия гидротермального раствора его внутренние стенки футеруют. Тип футеровки зависит от температуры, давления, агрессивности среды и фугитивности кислорода или активности иного агента. Обычно используют золото и платину. Фторопласт используется при низкой температуре (до 200 С), при проведении ионно-обменных опытов.

В ряде случаев используют автоклавы с возможностью проводить пробоотбор или добавлять новые порции раствора. Автоклавы эти не рассчитаны на большое давление, так как имеют минимум два ввода, оборудованные игольчатыми запорами. Изготавливают их из специальной жаропрочной стали или титана. Внутри они могут иметь футеровку, выполненную из фторопласта, серебра, золота, платины или никеля.

Моделирование низкотемпературных гидротермальных процессов, происходящих при нормальном давлении и температуре близ комнатной, обычно выполняют в специальных проточных ячейках, которые выполнены из фторопласта или оргстекла. Объем ячеек редко превышает 50 мл. Конструкция таких ячеек позволяет пропускать через образец раствор и контролировать скорость его протекания. Наряду с этим используются и термостатированные ячейки с рабочей температурной до 100 С.

Рост из газовой фазы обычно проводят в кварцевых трубках. Обычно размер получаемых кристаллов не превышает 100 мкм. Чаще всего так синтезируют сульфиды.

ИЭМ РАН оснащен не только оборудованием для синтеза аналогов минералов и горных пород, но и аналитическим оборудованием для изучения вещества, в т.ч. полученных в экспериментах образцов.

## **Аналитическое оборудование общего и специального назначения**

### **Рентгеновский дифракционный анализ**

- ДРОН-7 – рентгеновский дифрактометр для анализа порошков.
- Рентгеновский дифрактометр D8 ADVANCE фирмы Bruker с приставкой для определения фазового состава зерен ~ 5 мкм.
- Рентгеновский дифрактометр D2 Phaser фирмы Bruker.

### **Молекулярная спектроскопия**

- Инфракрасный Фурье-спектрометр Avatar 360, оснащенный ИК-микроскопом Continuum.
- Спектрометр комбинационного рассеяния света Renishaw (RM1000), оснащенный микроскопом Leica.
- Комплекс для спектральных исследований фирмы Bruker, включающий:
  - инфракрасный фурье-спектрометр Vertex 70;
  - Фурье–спектрометр комбинационного рассеяния Ram 2;
  - решеточный спектрометр комбинационного рассеяния света Senterra, оснащенный микроскопом Olympus.
- Приставки специальные:
  - Ячейка для ИК-спектроскопии поглощения. Температура до 500°C, давление до 100 МПа; изменение толщины поглощающего слоя (0–1.5 мм) в процессе опыта; подвижная термopара; статический или проточный режим.
  - Ячейка для спектроскопии комбинационного рассеяния света. Температура до 500°C, давление до 1500 бар; одно сапфировое окно; возможность изоляции от среды, передающей давление; статический или проточный режим.

### **Электронная микроскопия и микрорентгеноспектральный (электронно-зондовый) анализ**

- Цифровой сканирующий микроскоп Tescan Vega TS5130MM (Camscan MV2300), изготовленный фирмой s.r.o. Tescan (Чешская Республика), с энергодисперсионным

- спектрометром INCA Energy 450 с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA PentaFET x3, изготовленный фирмой Oxford Instruments (Великобритания);
- Цифровой сканирующий микроскоп Tescan Vega II XMU с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA x-sight и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700.
  - Оборудование для подготовки образцов для исследований на сканирующих электронных микроскопах:
    - поляризационный микроскоп Nikon Eclipse LV100 Pol с цифровой камерой Nikon DS-Fi1 и контрольным блоком Nikon DS-L2, изготовленный фирмой Nikon (Япония);
    - вакуумный пост EMITECH K550X для магнетронного напыления на исследуемые образцы золотого токопроводящего покрытия с приставкой EMITECH K250 для термического напыления углеродного токопроводящего покрытия, изготовленные фирмой Quorum Technologies Ltd. (Великобритания);
    - вакуумный пост Eiko IB-3 для магнетронного напыления на исследуемые образцы серебряного токопроводящего покрытия, изготовленная фирмой Eiko Engineering Co (Япония), с приставкой для термического напыления углеродного токопроводящего покрытия, изготовленной фирмой ООО "Системы для микроскопии и анализа" (Москва, РФ);
    - вакуумный пост ВУП-2 для термического напыления на исследуемые образцы углеродного токопроводящего покрытия.

#### **Мёссбауэровская спектроскопия**

- Мёссбауэровский спектрометр Ms-1104Em. Спектрометр снабжен проточным криостатом на жидком азоте.
- Мёссбауэровский спектрометр Ms - 1104Em – 1.

#### **Калориметрическое оборудование**

- Высокотемпературный вакуумно-блочный калориметр для определения стандартной энтальпии образования соединений.
- Калориметр Кальве капельного типа.
- Дифференциальный сканирующий калориметр для определения теплоты растворения в агрессивных средах. Масса образца 5 -10 мг.
- Установка дифференциального термического анализа ДТА до 1400 С.

## **Электрохимическое оборудование**

Комплекс оборудования для измерения электрохимических параметров (ЭДС-температура) твердофазных реакций в гальванических ячейках с общим и разделенным газовым пространством в температурном диапазоне 50-900 С и давлении 1-7000 бар. Для высокobarных измерений применимы только ячейки с общим газовым пространством.

В качестве твердых электролитов с Ag-ионной проводимостью используются RbAg<sub>4</sub>I<sub>5</sub>, AgI и AgCl, с кислород-ионной проводимостью используется ZrO<sub>2</sub>, стабилизированный Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (12 мас. %). Комплекс снабжен специальной измерительной системой и компьютерной программой обработки данных.

## **Прочее аналитическое оборудование**

- Атомно-абсорбционный спектрофотометр ААС Квант-2АТ.
- Прибор для определения содержания воды в силикатных стеклах методом КФТ (Karl-Fischer-Titration Agua).

Авторы благодарны чл.-корр. РАН И.В.Пекову за ценное обсуждение содержания пособия и Д.А.Ханину за помощь при описании экспериментального оборудования ИЭМ РАН.

## **Литература**

<http://www.iem.ac.ru/>

Булах А.Г. Общая минералогия. СПб.: Изд-во С.-Петербур. Ун-та, 1999, 356с.

Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р., Батанова А.М., Щекина Т.И., Плечов П.Ю. Экспериментальная и техническая петрология. М.: Научный мир, 2000, 416 с.  
<https://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1164637&uri=index.html>

Леонюк Н.И., Копорулина Е.В., Волкова Е.А., Мальцев В.В. Кристаллография: зарождение, рост и морфология кристаллов. М.: Юрайт, 2017, 152 с.

Леонюк Н.И., Копорулина Е.В., Волкова Е.А., Мальцев В.В. Рост кристаллов. Лабораторный практикум с основами теории. Учебное пособие – М.: ГЕОС, 2014. – 142 с.

Миловский А.В., Кононов О.В. Минералогия. М.: Изд-во МГУ, 1982

Мурашкевич А.Н., Жарский И.М. Теория и методы выращивания монокристаллов. Минск: БГТУ, 2010. – 214 с. ISBN 978-985-530-005-3.