

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.Н. Юричев

МЕТАМОРФИЗМ

Учебное пособие

Второе издание, дополненное

Допущено УМО по классическому университетскому образованию в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам бакалавриата (05.03.01) и магистратуры (05.04.01) по направлению подготовки «Геология»

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2016

УДК 552.16
ББК 26.3Я73
Ю738

Юричев А.Н.

Ю738 **Метаморфизм : учеб. пособие. – 2-е изд., доп. –**
Томск : Издательский Дом ТГУ, 2016. – 194 с.
ISBN 978-5-94621-545-9

В учебном пособии изложены основные сведения о метаморфизме, общие представления о методах изучения и картирования метаморфических комплексов. Охарактеризованы основные понятия и определения, приведены схема метаморфических фаций, элементы химической термодинамики и кинетики, парагенетический анализ, способы оценки температуры, давления и состава флюида, геологические обстановки образования, а также рассмотрены вопросы формирования и распространения важнейших метаморфогенных полезных ископаемых.

Для студентов геологических специальностей университетов и аспирантов.

УДК 552.16
ББК 26.3Я73

Рецензент

доктор геолого-минералогических наук,
профессор *А.И. Чернышов*

ISBN 978-5-94621-545-9 © Юричев А.Н., 2016
© Томский государственный университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	5
1. ПОНЯТИЕ МЕТАМОРФИЗМА И ЕГО ФАКТОРЫ	6
1.1. Определение понятий	6
1.2. Факторы метаморфизма и их значение	7
1.3. Классификация метаморфических процессов	14
1.4. Тектонические обстановки развития метаморфических процессов.....	16
2. ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ	21
2.1. Определение основных понятий	21
2.2. Функции состояния системы (термодинамические функции)	23
3. ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	30
3.1. Основные определения и понятия	30
3.2. Скорость реакций	31
3.3. Химическая кинетика метаморфических процессов	32
4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТАМОРФИЗМА	42
4.1. Химическое равновесие в метаморфических процессах	42
4.2. Обратимость-необратимость химических реакций при метаморфизме	44
4.3. Правило фаз и его применение к метаморфическим процессам	46
4.4. Типы метаморфических реакций	49
4.5. Выводы	61
5. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	63
5.1. Методы оценки давления, температур и состава флюида при метаморфизме	63
5.2. Минералогические термометры и барометры	67
5.3. Флюидные (газово-жидкие) и расплавные включения в минералах	69

6. ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ	77
6.1. Парагенетический анализ и диаграммы парагенезисов	77
6.2. Критерии устойчивого сосуществования метаморфических минералов	79
6.3. Петрогенетическая сетка	74
6.4. Графическое изображение парагенезисов метаморфических пород	83
6.5. Расчет топологии фазовых диаграмм метаморфических пород (пучковые диаграммы Скрейнмакенса)	89
6.6. Метаморфические ступени	90
6.7. Метаморфическая зональность	93
6.8. Инвертированная метаморфическая зональность	93
7. МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФАЦИИ	96
7.1. Определение понятия «метаморфическая фация»	96
7.2. Развитие учения о метаморфических фациях	98
7.3. Классификация метаморфических фаций	113
8. ДИНАМОМЕТАМОРФИЗМ	134
8.1. Общая характеристика	134
8.2. Классификация и номенклатура	137
9. ИМПАКТНЫЙ (УДАРНЫЙ) МЕТАМОРФИЗМ	145
9.1. Общая характеристика	145
9.2. Текстурно-структурные и минералогические особенности импактитов	152
9.3. Систематика импактных горных пород	155
10. МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ	159
10.1. Формационный анализ метаморфических пород	159
10.2. Полезные ископаемые метаморфических комплексов	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	187
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	188

1. ПОНЯТИЕ МЕТАМОРФИЗМА И ЕГО ФАКТОРЫ

1.1. Определение понятий

Метаморфические породы возникают в результате глубокого преобразования осадочных, магматических или ранее существовавших метаморфических пород, которые называются исходными или первичными. Процессы метаморфизма происходят на глубинах, расположенных ниже зоны формирования осадочных пород.

Метаморфизм представляет собой процесс минералогического, структурно-текстурного, а иногда и химического приспособления исходных пород к новым термодинамическим и химическим условиям, происходящий при повышенных температурах и давлениях.

Таким образом, при метаморфизме в различных сочетаниях изменяются минералогический состав, структурно-текстурные особенности и, в отдельных случаях, химический состав исходных пород.

Характерной особенностью любого метаморфического процесса является перекристаллизация исходной породы в твердом состоянии. Иначе говоря, в каждый данный момент метаморфического процесса ни вся порода в целом, ни сколько-нибудь ее существенная часть не переходят в растворенное или расплавленное состояние. Жидкая фаза при метаморфизме присутствует только в подчиненных количествах.

Всякий метаморфизм сопровождается перемещением и перегруппировкой вещества, которые происходят в ходе перекристаллизации исходной породы. В одних случаях перемещение и перегруппировка вещества носят характер взаимодействия между составными частями исходной породы. При этом метаморфический процесс не сопровождается сколько-нибудь существенным изменением валового химического состава исходной породы (содержание воды и углекислоты не учитывается). Такой метаморфизм, не сопровождаемый привнесом и выносом компонентов, называется ***изохимическим мета-***

морфизмом или просто метаморфизмом. Вместе с тем в природе широким распространением пользуются процессы метаморфизма, при которых происходит не только минералогическое и структурно-текстурное изменение исходной породы, но и коренное изменение ее химического состава. Такие метаморфические процессы называются **неизохимическими, или метасоматозом.** Таким образом, метасоматозом именуется процесс замещения породы в целом или отдельных минералов с изменением химического состава. При этом растворение исходных минералов и образование новых происходят одновременно, так что порода в течение всего процесса сохраняет твердое состояние. В общем метасоматоз представляет собой процесс, при котором в результате привноса и выноса компонентов происходит трансформация валового химического состава изменяемой породы одновременно с ее перекристаллизацией.

Таким образом, под **метаморфизмом** (греч. *metamorphoōtai* – подвергаюсь превращению, преображаюсь) мы будем понимать процесс твердофазного минерального и структурного изменения магматических, осадочных и ранее метаморфизованных пород под воздействием факторов метаморфизма – температуры, давления и глубинных флюидов.

1.2. Факторы метаморфизма и их значение

Метаморфизм исходных горных пород происходит под влиянием высокой температуры, высокого литостатического и одностороннего давления, а также химически активных растворов (флюидов), которые называются факторами или агентами метаморфизма. Например, повышение температуры способствует реакциям дегидратации и декарбонатизации; рост давления ведет к кристаллизации более плотных фаз; поля устойчивости минералов, содержащих H_2O и CO_2 , существенно зависят от состава флюида.

Большое значение при перекристаллизации исходных горных пород имеет длительность геологического времени. Экспериментальные исследования показывают, что результаты моделиро-

вания геологических процессов в лабораторных условиях часто не сопоставляются с природными процессами в силу краткосрочности экспериментов и невозможности учета всех условий, имевших место в природе.

Рассмотрим подробнее значение каждого из перечисленных факторов метаморфизма.

1.2.1. Температура

Температура является ведущим фактором метаморфизма. Она стимулирует начало и увеличивает скорость химических реакций. Это обстоятельство при метаморфизме приобретает особое значение в связи с тем, что метаморфическим изменениям подвергаются породы, сложенные малоактивными при обычных температурах минералами. При воздействии на породы повышающейся температуры увеличивается их пористость, что приводит к повышению проницаемости флюидов. По данным Дж. Джонстона и П. Ниггли, скорость химических реакций удваивается при повышении температуры на 10°C , при возрастании температуры на 100°C скорость реакций увеличивается в тысячу раз, а при повышении температуры на 200°C – в миллион раз.

Нижний предел температуры метаморфизма, по А. Миясиро, близок к 150°C ; В.С. Соболев считает минимальной температурой 380°C . Эта температура отвечает устойчивости хлоритов, самых низкотемпературных минералов изохимического метаморфизма. Метасоматоз может проходить при 100°C и ниже. Верхняя температурная граница метаморфизма для пород, близких по составу к гранитам, не превышает $700\text{--}750^{\circ}\text{C}$, а для пород основного состава – $1\ 000\text{--}1\ 100^{\circ}\text{C}$.

При изучении метаморфизма всегда возникает необходимость определения источников температуры. Возможными источниками повышения температуры являются близость магматических масс; повышение температуры с увеличением глубины; тепло, выделяющееся при тектонических движениях, и тепло, приносимое из недр Земли интрателлурическими растворами.

В недрах Земли тепло генерируется в результате следующих процессов: 1) гравитационной (плотностной) дифференци-

ации, благодаря чему Земля приобрела оболочечное строение; 2) распада радиоактивных элементов; 3) приливного взаимодействия Земли и Луны.

Тепло, выделяющееся при плотностной дифференциации вещества, превышает тепло, выделяющееся из других источников. Расслоение Земли на оболочки активно протекало 2–3 млрд. лет. Источник тепла, связанный с гравитационной дифференциацией вещества внутри Земли, функционирует по настоящее время.

Твердые приливы, связанные, главным образом, с гравитационным влиянием на Землю ее спутника – Луны, являются генератором тепла в земных недрах. Притяжение Луны вызывает на Земле приливные вздутия, перемещающиеся в приповерхностной зоне, при этом кинетическая энергия переходит в тепловую. Вклад твердых приливов в общий тепловой баланс не превышает первых процентов, но в прошлом, когда расстояние между Землей и Луной было гораздо меньшим, этот генератор тепла имел большее значение.

Радиоактивный распад элементов – один из важнейших процессов, генерирующих тепло в земных недрах. Считают, что он является основным источником энергии внутриземных процессов, в том числе и метаморфических. Наиболее важные теплотворные изотопы – это ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th , имеющие длительные периоды полураспада, которые измеряются миллионами лет. Например, период полураспада ^{238}U равен 4 500 млн. лет, а у наиболее долгоживущего изотопа ^{232}Th – 13 900 млн. лет. В ядре планеты радиоактивные элементы отсутствуют, большая их часть сосредоточена в земной коре и мантии.

Тепло из глубин переносится конвективным и кондуктивным путями. **Конвективный теплоперенос** – это перенос тепла магмой, флюидом. **Кондуктивный теплоперенос** – это перенос тепла путем механического колебания атомов и молекул в кристаллической решетке минералов.

Несмотря на исключительно большую роль высоких температур, действие только одной высокой температуры без участия химически активных растворов не может обеспечить суще-

ственной перекристаллизации исходных пород. Только совместное действие высокой температуры и химически активных растворов может привести к коренному преобразованию пород.

1.2.2. Давление

Давление в Земле является вторым важным фактором, контролирующим метаморфические процессы. Различают литостатическое и ориентированное давление (стресс).

Общее давление в земной коре складывается из литостатического давления, возрастающего с глубиной, и давления флюидов, заполняющих поры в горных породах (флюидное давление). **Литостатическое давление** – это давление нагрузки, является всесторонним, определяется весом вышележащих толщ. **Поровое флюидное (гидростатическое) давление** обычно уравнивают с общим всесторонним давлением нагрузки. Главные флюидные компоненты – вода и углекислота (в меньших количествах сернистый газ, хлор и др.) присутствуют в поровых пространствах между зёрнами, в мельчайших трещинах практически всех пород, в особенности осадочных. В недрах Земли породы и заключенные в них флюиды подвергаются воздействию нагрузки вышележащих толщ и температуры. При этом флюиды оказывают на окружающую среду внутри порового пространства парциальное давление и способствуют химическим реакциям. В большинстве случаев принимается, что $P_{фл} = P_{лит}$, однако это условие не всегда соблюдается. Давление флюида может превышать литостатическое, в таком случае применяют термин «флюидное сверхдавление» (Добрецов Н.Л. с соавт., 1980; Сазонов А.М., 2007).

Величина всестороннего давления возрастает в зависимости от плотности пород в среднем на 270 бар на каждый километр погружения. Например, на глубине 10 км давление нагрузки соответствует 2,7 кбар, а на глубине 20 км – 5,4 кбар. В орогенных зонах в нижней части земной коры давление нагрузки оценивается в 15 кбар. Однако изучение минеральных парагенезисов, полученных экспериментальным путем, и сопоставление их с природными минеральными ассоциациями позволяют предпола-

гать давление при метаморфизме, иногда достигающее 25–30 кбар. В связи с этим В.С. Соболев допускает возможность локального повышения давления в результате мощных тектонических движений. В процессе быстрых тектонических смещений (в зонах разломов) возникающее давление будет существенно превышать литостатическое.

Ориентированное давление, или **стресс**, как фактор метаморфизма еще недостаточно изучено.

Долгое время широким признанием пользовалась концепция А. Харкера о существовании стресс-минералов, устойчивых только в условиях сильного ориентированного давления. К таким минералам были отнесены дистен, ставролит, хлоритоид и т.д. Однако развитие стресс-минералов в породах, не испытавших стресса, совместное нахождение стресс- и антистресс-минералов и экспериментальные данные позволили сделать вывод о неприемлемости концепции А. Харкера в ее первоначальном виде.

По современным представлениям, породы, подвергшиеся ориентированному давлению, сминаются в складки либо дробятся, либо накапливают энергию деформации. Поведение пород при стрессе определяется их физическими свойствами, а также температурой, флюидным давлением в системе и глубиной протекания процесса. Горные породы при одностороннем давлении могут вести себя как хрупкие, пластичные и упругие тела. Благодаря стрессу метаморфические породы приобретают директивные текстуры (механическую и кристаллизационную сланцеватость, гнейсовидность). При метаморфизме он также нередко выступает как каталитический фактор, ускоряющий химические реакции и облегчающий циркуляцию химически активных растворов.

1.2.3. Химически активные растворы (флюиды)

Флюиды – неперенные участники метаморфизма. Несмотря на незначительный объем флюидной фазы, в метаморфизирующей системе их значение чрезвычайно велико. Во всяком случае, без участия хотя бы минимальных количеств растворов

практически невозможны процессы перекристаллизации при метаморфизме, невозможны процессы взаимодействия между минеральными компонентами исходных пород.

Наиболее важными и преобладающими компонентами флюида являются вода и углекислота при подчиненном количестве сероводорода, соединений хлора, фтора, бора, гидроксидов калия, натрия, кальция. Средний состав метаморфизирующего порового флюида, по данным В.С. Соболева, характеризуется следующими соотношениями молекулярных долей: 84 H₂O; 10 CO₂; 2 H₂S; 2 HF; 1,5 HCl; 0,5 N₂. Вопрос об агрегативном состоянии химически активных растворов решается в пользу жидкого или жидкообразного состояния водных растворов. Это подтверждается, по мнению Д.С. Коржинского, независимостью активности воды от величины литостатического давления. Углекислый газ находится при метаморфизме, по-видимому, в газообразном состоянии, что определяет повышение его активности с увеличением давления.

В метаморфизируемых породах флюиды перемещаются путем **диффузии** и **инfiltrации**. Диффузионная миграция осуществляется путем перемещения веществ через неподвижные поровые растворы в сторону падающей концентрации. Миграция второго типа, называемая фильтрационной, происходит в результате медленного просачивания химически активных растворов по мелким трещинам, зонам рассланцевания и дробления.

Вода увеличивает проницаемость пород за счет большой смачивающей способности кристаллов. Кислоты и щелочи, растворенные в ней, усиливают данный эффект. Восстановленные флюиды (H₂ и др.) обладают низкой способностью смачивания.

Степень перекристаллизации зависит от окисленности метаморфизирующего флюида. Состав флюида зависит от состава подвергающихся метаморфизму пород. При метаморфизме глин, алевролитов и других первично терригенных осадков за счет реакций дегидратации выделяется вода. Напротив, при метаморфизме карбонатов высвобождается углекислота. При смешанном составе толщ должно меняться и соотношение между H₂O и CO₂ во флюиде. Флюиды могут быть кислотными (H₂S, CO₂, Cl₂, F₂), щелочными (KOH, NaOH, Ca(OH)₂) и нейтральными.

Например, процессы регионального метаморфизма проходят под воздействием растворов, близких к нейтральным; локальные процессы метаморфизма и метасоматоза осуществляются при воздействии щелочных или кислотных растворов.

Роль флюидов в метаморфических процессах многогранна. Они являются хорошим катализатором (в присутствии флюида идут легче реакции, быстрее устанавливается равновесие), средой, в которой переносятся компоненты химических реакций. Большая роль флюидов заключается в транспортировке тепла и его генерации. На больших глубинах присутствуют главным образом восстановленные флюиды. При их движении к поверхности они подвергаются окислению, благодаря чему выделяется значительное количество тепла.

Вопрос об источниках флюидных растворов трактуется разными исследователями неоднозначно. Таковыми могут быть небольшие количества растворов, первично содержащихся в порах и мельчайших трещинках исходных пород. Количество таких растворов значительно варьирует в различных типах пород, однако в среднем, по данным У. Хуана, равняется 3%. Источником химически активных растворов во многих случаях являются магматические расплавы, внедрившиеся в толщу литосферы. Особенно большие количества растворов связываются с кислыми магмами, очень богатыми флюидной массой. Многие исследователи большую роль отводят глубинным сквозьмагматическим растворам, которые, поступая в литосферу, несут не только химически активные вещества (прежде всего H_2O), но и большие запасы тепловой энергии. Во всех случаях количество химически активных растворов остается незначительным, и эти растворы называются поровыми.

По современным представлениям предполагается, что основным источником флюидов является мантия, генерирующая флюиды в результате процессов дифференциации мантийного вещества. В меньшей степени признается определяющая роль порового флюида пород коры и летучих компонентов магм. В каждом конкретном случае вопрос об источнике метаморфического флюида должен решаться самостоятельно.

1.3. Классификация метаморфических процессов

В настоящее время выделяются две большие группы метаморфических процессов: изохимический метаморфизм и неизохимический (метасоматоз).

Изохимический метаморфизм представляет собой совокупность процессов минералогического и структурно-текстурного приспособления исходных пород к новым РТ-условиям, не сопровождаемых коренным изменением их химического состава.

Метасоматоз (метасоматизм) предусматривает процессы метаморфического изменения, при которых происходит не только минералогическое и структурно-текстурное, но и химическое приспособление исходных пород к новым условиям с коренным изменением их химического состава.

Таким образом, изохимический метаморфизм – это метаморфизм без привноса-выноса петрогенных компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO и др.). Неизохимический метаморфизм – это метаморфизм с привносом-выносом петрогенных компонентов.

Процессы метаморфизма по преобладанию (интенсивности) того или иного фактора метаморфизма подразделяются на следующие типы: контактовый (термальный), динамометаморфизм (катакластический), динамотермальный (региональный), ультраметаморфизм и метасоматоз.

Контактный (термальный) метаморфизм связан с непосредственным воздействием на исходные горные породы магматических масс (интрузивных или эффузивных). Данный тип метаморфизма характеризуется относительно малой мощностью зон изменения. Его ведущим фактором является высокая температура, при этом другие факторы играют подчиненную роль. Химически активные растворы действуют как катализаторы химических реакций и являются средой для взаимодействия между компонентами. В ходе контактового метаморфизма возникают породы, которые называются роговиками.

Контактный метаморфизм осуществляется всегда на малых глубинах ($P = 2-3$ кбар), на больших глубинах он становится не-

отчетливым и сливается с региональным метаморфизмом, а поэтому между ними возможны все переходы.

Динамометаморфизм (катакластический метаморфизм) связан с воздействием на породы сильного стресса при сравнительно невысоких температурах и низком гидростатическом давлении. Химически активные растворы большой роли не играют. В отличие от контактового метаморфизма, при котором главная роль принадлежит перекристаллизации, при динамометаморфизме основным процессом является механическое дробление пород и минералов, переходящее иногда в пластическое течение раздробленных частиц. Породы, возникающие при динамометаморфизме, обозначаются разными терминами и не имеют общего названия.

Динамотермальный (региональный) метаморфизм связан с одновременным воздействием на исходные породы высокой температуры, большего гидростатического давления и сильного стресса. Химически активные растворы всегда участвуют в метаморфизме, но не оказывают решающего влияния на состав пород. Главным преобразующим процессом являются перекристаллизация и, возможно, пластическое течение. Породы этого типа метаморфизма называются кристаллическими сланцами и гнейсами.

В отличие от контактового региональный метаморфизм проявляется на обширных территориях в пределах складчатых областей и выступов фундамента на платформах. Здесь тепловой источник часто не ясен. Давление при региональном метаморфизме меняется от 2–3 до 10–15 кбар, температура от 300 до 900°С.

Ультраметаморфизм объединяет процессы, происходящие при очень высоких температурах в глубоких зонах литосферы. В процессах метаморфизма участвуют магматические расплавы гранитоидного состава. Породы этого метаморфизма называются мигматитами, которые характеризуются одновременным присутствием метаморфического и магматического компонентов.

Метасоматоз (метасоматизм) связан с одновременным воздействием на исходные породы высокой температуры и химически активных растворов, действие которых приводит к ко-

ренному изменению химического состава, в результате привноса одних и выносу других компонентов.

Специфическим типом метаморфизма является **импактный (ударный) метаморфизм**. Данный тип метаморфизма протекает на земной поверхности в результате падения метеоритов. Он не связан с эндогенными и экзогенными процессами, а является геокосмическим процессом, поэтому в Петрографическом кодексе России 2008 г. его предлагается выделить в самостоятельный класс породообразующих процессов. В некоторых учебных пособиях продукты ударного метаморфизма рассматривают в составе катакластического метаморфизма.

Метаморфизм, протекающий на стадии повышения температуры, называется **прогрессивным**. В присутствии фаз, содержащих H_2O и CO_2 , он идет с их выделением. Метаморфизм, идущий на стадии понижения температуры, называется **регрессивным**. Кроме прогрессивного и регрессивного метаморфизма выделяется еще **диафторез**. Это тот же регрессивный метаморфизм, но время его проявления оторвано от главного этапа метаморфизма, т.е. он является наложенным. Диафторез, как правило, приурочен к зонам глубинных разломов и протекает при избытке флюида. Поэтому высокотемпературные парагенезисы часто полностью замещаются низкотемпературными парагенезисами.

1.4. Тектонические обстановки развития метаморфических процессов

Сопоставление метаморфических процессов с другими эндогенными процессами, а также с результатами экспериментального моделирования показывает, что процессы метаморфизма могут реализовываться только в активных тектонических обстановках с дополнительным поступлением энергии в нижние и средние уровни земной коры в форме флюидов, магм или тепла за счет трения. Практически все проявления активного тектогенеза в литосфере приурочены к границам литосферных плит. В настоящее время выделяются три типа таких границ: дивергентные, конвергентные и трансформные.

Дивергентные границы представлены зонами спрединга, образующими мировую систему срединно-океанических хребтов (СОХ). Эти зоны, новообразования океанической коры за счет поступления и дифференциации мантийных выплавов, характеризуются высоким теплотокном, что определяет возможность проявления метаморфических процессов даже в верхних горизонтах коры. Однако деформационные процессы здесь проявлены очень слабо либо вообще отсутствуют.

Конвергентные границы литосферных плит подразделяются на четыре типа:

- 1) океаническая плита с океанической плитой;
- 2) океаническая плита с континентальной плитой;
- 3) океаническая плита по системе островных дуг с континентальной, вдоль активной континентальной окраины;
- 4) континентальная плита с континентальной плитой.

Для первых трех типов деформационные, магматические и метаморфические события контролируются процессами субдукции, для четвертого типа – процессами столкновения континентальных масс. Метаморфические процессы здесь проявляются в зонах орогенеза, под которыми обычно понимаются деформационные процессы на границах плит. Для границ 1–3-го типов характерны **аккреционные орогены**, для границ 4-го типа – **коллизионные**.

Аккреционные орогены характеризуются контрастным стилем метаморфических преобразований. В зонах субдукции проявляется высокобарический метаморфизм, соответствующий низким значениям геотермы, а надсубдукционные зоны характеризуются высоким теплотокном, обуславливающим значительный разогрев коры уже на уровне 10–15 км. Для большинства наблюдаемых здесь метаморфических комплексов фиксируются пониженные давления при широких вариациях температур метаморфизма.

В коллизионных орогенах характер деформационных, магматических и метаморфических процессов значительно более сложный, чем в аккреционных, поскольку здесь может фиксироваться предшествующая аккреционная история с наложением дополнительных событий уже коллизионного этапа. Значи-

тельное утолщение коры, сложный характер деформационных процессов с формированием зон глубинных надвигов определяют проявление метаморфизма разных типов на разных уровнях земной коры: зональных кианит-силлиманитового и андалузит-силлиманитового, инвертированного (см. гл. 6.8) зонального метаморфизма.

Трансформные границы литосферных плит могут развиваться при процессах «косого» схождения плит. При этом касательные напряжения на границах плит могут приводить к смене во времени конвергенции и сдвиговых соотношений или к сложному сочетанию сдвиговых и субдукционных границ. Характер метаморфических процессов здесь в модельном и геологическом плане остается слабо изученным по настоящее время.

Отметим, что процессы активного тектогенеза помимо границ литосферных плит могут проявляться и в зонах внутриконтинентального растяжения, развивающихся, как правило, после кульминационных коллизионных событий. Однако метаморфические комплексы, для которых реально подтверждена связь с процессами континентального растяжения, достаточно редки.

Приведем построенный Е.В. Скляровым с соавторами гипотетический разрез земной коры с типичными обстановками проявления метаморфических процессов (рис. 1). Как видно из рисунка, для разных тектонических обстановок характерны следующие типы метаморфизма.

В пределах СОХ проявляется высокоградиентный зональный метаморфизм очень низких давлений в связи с разогревом коры в верхних ее частях. Характерна хорошая сохранность первичномагматических структур и текстур, т.е. метаморфические изменения носят псевдоморфный характер.

В зонах внутриокеанической обдукции метаморфические процессы могут фиксироваться в зоне глубинного надвига. Необходимым условием является проявление тектонических процессов в пределах неостывшей океанической коры, т.е. близости от СОХ. Метаморфические зоны очень узки (до 1 км) и высокоградиентны (до 1000°С/км). Нередко здесь отмечается инвертированная зональность.

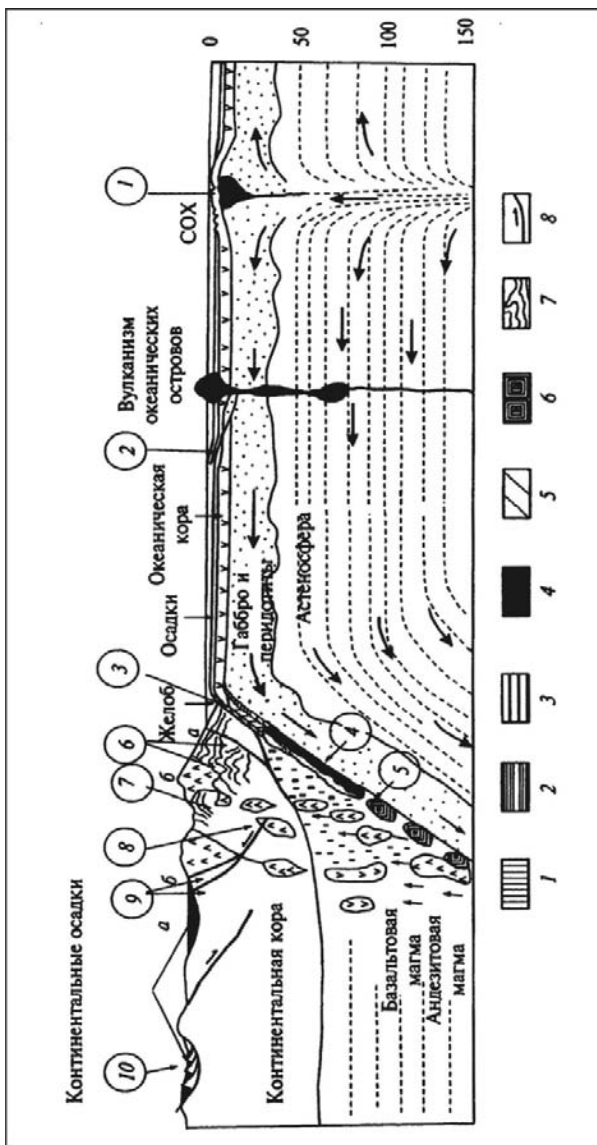


Рис. 1. Схема проявления метаморфизма в пределах земной коры: 1 – амфиболиты; 2 – серпентиниты; 3 – глаукофан-сланцевые комплексы; 4 – эклогиты; 5 – реликты океанических осадков, затощенные на глубокие уровни в зону субдукции; 6 – ультравысокотемпературные образования; 7 – комплексы аккреционной призм; 8 – зоны надвигов и направления перемещения. Типы метаморфизма (цифры в кружках): 1 – океанический; 2 – метаморфическая подошва (метаморфизм поддвижения); 3 – высокотемпературный (глаукофансланцевый); 4 – эклогитовый; 5 – ультравысокотемпературный; 6 – зональный; 7 – маглоглубинный гранулитовый; 8 – гранулитовый умеренных и повышенных давлений; 9 – инвертированный (а – кианит; б – андалузит-силлиманитовый); 10 – метаморфизм растяжения (Скляров Е.В. и др., 2001)

В зоне субдукции реализуются метаморфические преобразования высоких давлений. Ультравысокобарические комплексы, эклогиты и глаукофановые сланцы характеризуют метаморфические процессы на разных уровнях глубинности. Для надсубдукционной зоны характерны зональные комплексы низких давлений, метаморфизм которых обусловлен прогревом в результате внедрения магм, образующихся при плавлении субдуцирующей океанической плиты. При большом объеме внедряющихся магм отмечается появление малоглубинных гранулитов, фиксирующих максимальный разогрев средней части коры.

Метаморфические преобразования в коллизионных зонах контролируются значительным увеличением мощности коры с последующим ее прогревом. Важным фактором здесь также являются синметаморфические процессы глубинного надвигообразования, нарушающие термальную структуру коры и обеспечивающие одновременное проявление метаморфизма низких и умеренных давлений. Именно тектонические процессы приводят к формированию необычных инвертированных метаморфических комплексов.

Метаморфизм в зонах континентального растяжения обусловлен предшествующим утолщением коры и поступлением базитовых мантийных магм в нижние горизонты коры. Внедрение магм приводит к массовым процессам плавления в нижних горизонтах коры и к их поступлению на более высокие уровни, что обеспечивает высокую прогреваемость коры в целом. Наиболее типичны в таких условиях низкобарические метаморфические комплексы и малоглубинные гранулиты.