

## 9. Заключение

### 9.1. Обсуждение основных результатов

В заключении подводятся общие итоги монографии, и формулируется некоторая концепция флюидного режима верхней коры. Авторы поставили перед собой цель исследовать волноводные слои в литосфере и астеносфере, а также трещиноватые структуры и флюидный режим верхней коры. Общий признак, который объединяет эти геологические объекты, состоит в том, что все они представляют собой трещиноватопористые (или просто пористые) насыщенные флюидом зоны. Эти зоны характеризуются затуханием сейсмических волн и повышенной электропроводимостью. Поэтому методы их исследования на всех уровнях земной оболочки примерно одинаковы.

Были рассмотрены сейсмические и геоэлектрические характеристики волноводов. Дано описание их распределения по регионам и глубинам – от верхней коры до астеносферы. Детальные сейсмические исследования коры выявили ряд аномальных особенностей в интервале глубин 10 – 25 км (средняя кора при ее мощности 40 – 45 км, и нижняя – при мощности 22 – 25 км). К ним относятся инверсия сейсмических скоростей и повышенная субгоризонтальная расслоенность. Акцент был сделан на изучении именно верхней коры. В этой области волноводы представляют собой реологически ослабленные слои, к которым выполаживаются глубинные разломы и по которым происходят субгоризонтальные подвижки земной коры. Волноводные слои контролируют распределение землетрясений в земной коре. Поэтому их можно считать частью структур разрушения верхней коры.

Суммируя указанные особенности, можно представить обобщенную геологическую модель земной коры следующим образом (рис. 48). В ее средней части имеет место изменение физических и реологических свойств. Там же находятся и зоны инверсии скоростей. Эти аномальные зоны влияют на геодинамические процессы, формирующие структурный план коры. Их роль в динамике земной коры (особенно, верхней коры) очень велика.

Был приведен обзор существующих представлений о природе волноводов и процессах в них. Эти исследования показали, что их существование действительно обусловлено наличием флюидов, обеспечивающих их особые акустические и электрофизические свойства. Как показали лабораторные исследования [Kern, 1982], небольшое содержание флюидов значительно меняет условия метаморфизма горных пород, их трансформацию и режим частичного плавления. Оказывается, что природа волноводов верхней коры и более глубоких частей коры, литосферы и астеносферы – разная.

Соотношение скоростей продольных и поперечных волн в инверсионных зонах и отдельных тонких слоях верхней коры позволяет предположить, что эта неоднородность не связана с изменением состава пород. Основной ее причиной является именно повышенная флюидонасыщенность (свободная вода). Данное предположение хорошо согласуется с повышенной электропроводностью того же интервала глубин и с данными глубокого бурения. Таким образом, закономерное распределение флюидов в коре и верхней мантии, возможно, является главным фактором, влияющим на процессы формирования расслоенности земной коры.

За геологические масштабы времени происходят значительные необратимые деформации земной коры. При этом происходит взаимодействие (механическое, химическое и физико-химическое) флюидов с вмещающими породами. В силу соотношения Био-Терцаги для тензора напряжений и эффекта Ребиндера флюиды влияют на прочностные характеристики горных пород. Само возникновение разломов и волноводов связано с динамикой флюидов.

Определенное внимание в монографии уделено качественному исследованию пороупругих, поровязких и разрушающихся сред, а также процессам фильтрации в этих средах. Приведены без вывода определяющие соотношения, а для пороупругих сред даны различные представления основных уравнений. Показано, что существующие теории разрушения наталкиваются на определенные трудности при описании структур разрушения верхней коры. Приведена дискуссия по поводу доминирующих факторов во флюидном режиме верхней коры. Цель этих качественных рассуждений состоит в том, чтобы выяснить возможность математического моделирования процессов разрушения и динамики флюидов в верхней коре. По объему материала и поставленным целям обзор самих математических моделей выходит за рамки данной монографии.

## **9.2. Концепция флюидного режима верхней коры**

Описанная выше стратификация верхней коры по степени концентрации рудных месторождений свидетельствует о том, что концентрация рудных веществ наиболее интенсивно и быстро происходит в верхнем 3-х километровом слое коры. Это означает, что сам механизм концентрации находится в этом слое. Здесь следует отметить два принципиальных момента.

Если предположить, что флюидная система в этом слое является замкнутой и изолированной (т.е. не взаимодействует с горными породами), то самопроизвольная концентрация любых веществ в этой изолированной системе противоречит второму началу термодинамики, согласно которому энтропия в ней должна возрастать. Действительно, концентрация любых веществ означает понижение энтропии. Отсюда следует, что флюидная система в верхней коре (и, особенно, в верхнем 3-х километровом слое) не может быть изолированной. Существует тесное взаимодействие флюидов с вмещающими породами. Среда трещиноватых пород верхней коры можно рассматривать как большую подсистему, поскольку работа тектонических сил значительно превышает энергию всех флюидных процессов, а масса горных пород также превышает массу флюидов. Именно поэтому и возможно понижение энтропии в малой, флюидной подсистеме, являющейся частью большой системы.

Второй принципиальный момент заключается в следующем. Многие вещества, которые концентрируются в верхних слоях коры, являются мало растворимыми. Поэтому указанное взаимодействие между флюидами и вмещающими породами должно носить характер многократных повторных движений флюидов.

Изложенные положения являются исходной точкой предлагаемой концепции флюидного режима верхней коры [Кузнецов, Каракин, 2002]. Далее задача сводится к нахождению конкретного механизма (или механизмов) этого взаимодействия. Смысл монографии заключается в том, чтобы продвинуться (насколько это возможно) в указанном направлении и очертить круг возникающих проблем.

Определенный интерес представляет концепция В.Н. Николаевского. Она дала качественное объяснение факту существования волноводов, листрических разломов и трещиноватой структуры верхней коры. Однако концепция сформулирована на эвристическом уровне и недостаточна для построения геомеханических моделей волноводов и листрических разломов. Несколько с другой стороны к этой проблеме подошел С.С. Григорян, который изложил известные феноменологические соотношения сейсмологии на языке механики разрушения. Его интерпретация позволяет глубже понять геомеханическую природу процессов, происходящих вблизи очага землетрясений и в разрушающейся среде верхней коры. В частности, предвестниковые явления интерпретируются как некоторое предварительное разрушение трещиноватой среды (предразрушение), при котором она еще сохраняет свойства сплошной среды.

Оба эти подхода позволяют предположить особое место дилатансионных процессов во флюидном режиме верхней коры [Кузнецов, Каракин, 2002]. Их роль в геологических процессах известна давно со времен Рейнольдса, открывшего это явление. В геологической и геофизической литературе это явление изучается с разных сторон [Файф, 1981; Николаевский, 1984a,b, 1996]. Его иногда называют тектоническим нагнетанием. В данной монографии было показано, что именно дилатансия, а также упругая консолидация и вязкая компакция в трещиноватых зонах, играют важную роль в качестве вынуждающего фактора миграции флюидов в верхней коре на большие расстояния. По своей интенсивности и масштабам действия эти процессы, скорее всего, являются доминирующими, по крайней мере, для континентальной коры. При этом совсем не отрицается роль других механизмов динамики флюидов: тепловой конвекции в окрестности магматических очагов и интрузий, а также различных физико-химических процессов на малых расстояниях.

Дилатансия трещиноватой зоны является принципиальным моментом (мотором) в динамике флюидов. Конкретная реализация этого механизма зависит от глубины расположения, масштабов и геометрии трещиноватой зоны, а также от тектонической и геологической обстановки данного региона. Чем больше размер и глубже расположена данная структура разрушения, тем больше ее характерное время движения и большая масса флюида вовлечена в миграционный процесс. Самой крупной структурой разрушения верхней коры являются коровые волноводы в ней. Была разработана их математическая модель [Каракин, 1990a, 2001; Каракин, Камбарова, 1997]. Было показано, что в этих волноводах могут возникать автоколебательные и автоволновые процессы с периодами от тысяч до многих десятков тысяч лет.

Далее по иерархии идут листрические и глубинные разломы. Последние достигают низов коры и проникают в мантию. Пространство между ними в верхней коре заполняют более мелкие разломы и трещиноватые зоны. Их колебания происходят более часто, а зона влияния ограничивается объемом, имеющим линейный размер соответствующего разлома или трещины. Каждый из элементов этой трещиноватой структуры действует в соответствии со своими собственными законами. В то же самое время он взаимодействует с элементами более высокого и низкого масштабных уровней. В целом эта система "дышит" и несколько напоминает кровеносную систему человека с той лишь разницей, что у каждого разлома есть свое собственное сердце. Этим сердцем являются дилатансионные процессы, возникающие при средних и мелких землетрясениях. Крупные землетрясения происходят в гигантских разломах, опоясывающих Землю. Они являются следствием глобальных геодинамических процессов, однако, мало влияют на флюидный режим верхней части континентальной коры.

Обычно дилатансионные процессы не действуют сами по себе в чистом виде. Главное движение флюидов происходит тогда, когда режим дилатансии заканчивается и начинается консолидация трещиноватой среды, сопровождающаяся выталкиванием флюида во внешнюю зону с последующей фильтрацией в окружающем пространстве. В комбинации с другими процессами этот механизм имеет сложную, многофакторную и многовариантную природу. Именно по этой причине его трудно распознать и исследовать как геофизическими средствами наблюдения, так и с помощью математического моделирования.

Вполне возможно, что именно по указанным причинам он оказался мало изученным и непонятым, хотя ему посвящено достаточное количество литературы. В этой связи был проведен анализ определяющих соотношений и некоторых условий на внутренних границах пористых деформируемых сред. В частности, исследованы три состояния – пороупругое, поровязкое и состояния разрушения упругой среды при развитии в ней рассеянной трещиноватости, а также при наличии поверхности разрыва. Эти

исследования необходимы для того, чтобы представить себе, насколько успешным может быть математическое моделирование процессов в верхней коре.

Более или менее удовлетворительными являются математические модели разломов планетарного (или крупного регионального) масштаба. В этих моделях рассматривается скольжение по поверхности разрыва с заданным законом скольжения. Есть модели нижней части коры в тектонически активных регионах, характеризующихся интенсивным магматизмом. Эти модели основаны на гидродинамике многофазных сред.

Что же касается верхней коры, то наиболее развитым и экспериментально обоснованным направлением в механике разрушения является изучение поведения пород в скважинах, выработках и шахтах (а также на лабораторных установках) при нормальных термодинамических условиях. Мы достаточно хорошо знаем законы разрушения на уровне одиночной трещины. Однако экстраполяция этих результатов на большие масштабы представляется весьма проблематичной.

Оказывается, что существующие подходы в механике разрушения трещиноватой среды мало применимы к условиям верхней коры. Трудности возникают при попытках моделирования процесса разрушения в хрупкой среде разломов верхней и средней коры, в которой происходит взаимодействие множества трещин. Учет указанного взаимодействия приводит к качественно новым законам разрушения на локальном уровне. В частности, вблизи разломов непосредственно до и после момента магистрального разрыва могут возникать тонкие эффекты, которые неизвестны в механике одиночных трещин. Определяющие соотношения разрушающейся среды в масштабах коры за геологические промежутки времени в некоторых случаях существенно отличаются от определяющих соотношений, полученных в лабораторных экспериментах. Например, ни одна из существующих теорий разрушения трещиноватой среды пока не в состоянии удовлетворительно объяснить возникновение и существование листрических разломов и волноводов верхней коры. Эти соображения необходимо учитывать при моделировании процессов в структурах разрушения верхней коры.

### 9.3. Приложения

Из рассмотренной выше концепции вытекают некоторые следствия, имеющие практическое значение. Понимание происхождения, структуры и динамики волноводов и других ослабленных зон верхней коры весьма существенно с точки зрения решения многих недропользовательских и геоэкологических проблем. Очевидно, что проницаемые ослабленные зоны являются главными проводниками миграции различных флюидов. С флюидным режимом в этих зонах связаны многие ключевые моменты процессов образования полезных ископаемых.

Проблема образования углеводородных (УВ) месторождений имеет давнюю историю. В западной литературе доминирующей является концепция органического происхождения залежей УВ промышленного масштаба. В России еще сильны позиции сторонников неорганической теории. Очевидно, что данная проблема сводится к соотношению интенсивности ювенильных и метеорных потоков флюидов. В монографии проведен анализ этих потоков. Было показано, что интенсивность метеорных потоков примерно на три порядка превышает интенсивность ювенильных флюидов. Это свидетельствует в пользу теории органического происхождения УВ. Другими словами, газовые и нефтяные месторождения образуются в результате повторных движений водных флюидов в верхней коре.

Можно предположить, что на протяжении фазы компакций флюиды из волновода отжимаются вверх. По мере продвижения флюиды могут упираться в непроницаемые антиклинальные структуры (ловушки) и генерировать аномально высокие давления

(АВПД). Обычно ловушки образованы антиклинальными складками непроницаемых пород. Если в восходящие потоки флюидов попадают концентрированные углеводороды, то возникают условия для образования их месторождений. В тех случаях, когда свод антиклинальных структур рассечен сетью разрывных нарушений, то по этим разломным зонам флюиды устремляются вверх и выбрасываются на дневную поверхность, образуя газовые выбросы или грязевые вулканы. Согласно предложенной гипотезе реально существующие нефтегазоносные поля и грязевые вулканы имеют общую природу. Единственное отличие грязевых вулканов состоит в том, что у них ловушки нарушены. Это объясняет расположение грязевых вулканов вдоль разломов и на склоне шельфа во флексурной зоне, где непроницаемые слои больше всего подвергаются разрушению. Аналогичным образом возникают и газогидратные месторождения, которые, возможно, содержат значительные запасы углеводородов [Гинсбург, Соловьев, 1994]. Для их образования необходимы соответствующие термодинамические условия.

Сходный вывод можно сделать и относительно механизмов образований рудных месторождений. Он заключается в том, что повторные движения метеорных вод играют большую роль в образовании рудных месторождений, чем это предполагалось до сих пор.

Интенсивные флюидные процессы происходят везде, где есть тектонические движения, разломы и другие трещиноватые, проницаемые зоны, умеренная сейсмичность и соответствующие флюиды. Никаких иных особых условий не требуется. Для образования месторождений необходимы источник полезного вещества и условия его сохранения (например, нефтяные и газовые ловушки). Сейсмичность необходима для того, чтобы ускорить химические и физико-химические процессы преобразования вещества [Черский и др., 1985; Иванов и др., 1978]. Механо-химический эффект может иметь место даже при отсутствии явно выраженной сейсмичности. Например, рост мелких трещин происходит при увеличении рассеянной трещиноватости, которая проявляется в акустической эмиссии.

Изложенную гипотетическую схему в целях наглядности можно выразить образным языком. Волноводы и разломы верхней коры представляют собой геологическую кухню, на которой происходят важнейшие процессы концентрации и преобразования минералов и растворенных веществ верхней коры. Шеф-поваром этой кухни, который готовит указанные блюда, являются тектонические движения (в основном горизонтальные), создающие сдвиговые смещения в трещиноватых зонах. У шеф-повара есть повара – умеренные и слабые сейсмические подвижки. Флюиды, мигрирующие на значительные расстояния по вертикали и горизонтали, играют роль услужливого официанта, который разносит готовые блюда (углеводородные и рудные вещества) до ресторанных столиков, т.е. до их месторождений.

Если волноводы и разломы верхней коры являются главными геологическими структурами, где происходит преобразование и перенос углеводородного и рудного вещества, то они сами по себе и процессы в них должны быть объектами внимания в различных технологиях прогноза, поиска и разведки полезных ископаемых. Приведенный выше (с элементами юмора) образ показывает, что связи между различными фазами процессов преобразования и переноса веществ являются достаточно сложными и неоднозначными. Поэтому для повышения эффективности указанных технологий необходимы специализированные объектно-ориентированные научные исследования.

Скорости естественного движения флюидов в верхней коре за геологические промежутки времени настолько малы, что эти движения трудно определять инструментальными методами. Об их интенсивности можно судить по изгибам кривой геотермы, по времени реанимации отработанных месторождений нефти и газа, по естественным выбросам воды и нефти, а также по другим косвенным проявлениям. Тем не менее, ва-

жен сам факт наличия этих движений. Представляют интерес также их направленность (вверх или вниз) и наблюдаемые эффекты.

В силу сказанного особое значение принимают методы математического моделирования. Модели динамики волноводов и разломов были предложены в работах [Каракин, 1990а, 2001; Каракин, Камбарова, 1997]. Для практических целей важно понимать суть флюидных процессов в зонах над волноводами. Первые шаги в этом направлении были предприняты в работе [Дмитриевский и др., 2000] и серии других аналогичных работ. В этой работе рассматривалась динамика газожидкостной смеси в трещиноватой пороупругой среде над волноводом. При этом предполагалось, что газовый импульс идет из волновода. Меняя положение и форму импульса, можно рассчитать движение газовой фазы в неоднородной трещиновато-пористой среде и смоделировать процесс образования газовых месторождений.

Экологические аспекты проблемы динамики флюидов в верхней коре не менее важны, хотя и не столь очевидны. Важный аспект этой проблемы связан с проблемой захоронения радиоактивных (РАО), промышленных и других токсичных отходов. Очевидно, что если есть возможность перерабатывать указанные отходы, то лучше это делать, чем их захоранивать. Однако иногда возникают непредвиденные катастрофические ситуации. Кроме того, захоронение уже переработанных (например, переведенных в твердое состояние) отходов все равно требует мониторинга за длительное время и гидрологической изоляции отходов. Проблема заключается в том, что время распада радиоактивных элементов достаточно велико. Поэтому соответствующие геоэкологические мероприятия планируются на большой промежуток времени (до 10 тыс. лет), превышающий время жизни одного поколения. Никакие инженерные или инженерно-геологические сооружения при существующем уровне техники и научной мысли не могут планироваться на такие интервалы времени.

В этой ситуации может иметь значение знание флюидного режима волноводов верхней коры и листрических разломов. Характерное время эволюции этих геологических объектов может оказаться соизмеримым со временем существования предполагаемых инженерных сооружений. В этих условиях могут быть приняты некоторые разумные инженерные решения. Например, атомные станции и места захоронения РАО можно будет строить в районе нисходящих флюидных потоков, возникающих в результате динамики волноводов или листрических разломов. В случае непредвиденных катастрофических ситуаций нуклиды будут увлекаться флюидами вниз, а не вверх.

Скопления газогидратов на шельфах океанов являются не только источником углеводородного сырья, но и могут привести и к серьезным экологическим последствиям. При изменении термодинамических условий они легко превращаются в газ. Поскольку запасы газогидратов гигантские, то указанные последствия могут носить глобальный характер. Особенно опасны внезапные резкие изменения климата и океанских течений. В частности, глобальное потепление климата может изменить структуру океанских течений и привести к выбросу метана в атмосферу, что в свою очередь может создать парниковый эффект. Все эти процессы, влияя друг на друга, могут происходить в нарастающем, лавинообразном режиме.

Как уже отмечалось ранее, природа является очень "расточительной и неорганизованной дамой". Большая часть углеводородного вещества уходит в атмосферу и лишь его сравнительно небольшая часть оседает в месторождениях. В этой связи следует обратить внимание на Антарктиду и Гренландию, которые покрыты вечным льдом. Процессы преобразования и миграции флюидов в этих регионах идут точно так же, как и на других континентах. Однако ледник радикально меняет флюидный режим у самой поверхности. Газ на границе порода-лед переходит в газогидратное состояние и делает породы непроницаемыми. При этих условиях природа из "безалаберной дамы" превращается в "скупую

го рыцаря". Углеводородные флюиды не в состоянии просочиться на поверхность и остаются в недрах. По этой причине в указанных регионах следует ожидать (по крайней мере, теоретически) наличие гигантских углеводородных месторождений, превосходящих по своим запасам все известные месторождения мира. Однако у этих месторождений есть одна особенность. Их разработка в небольших объемах экономически не целесообразна. Промышленное освоение этих регионов в больших масштабах грозит глобальной экологической катастрофой. Этот факт заставляет по-новому подойти к проблемам национальной принадлежности и промышленного освоения Антарктиды.

Для того чтобы все эти выводы сделать более убедительными (или опровергнуть их), необходимы более глубокие исследования на уровне математического моделирования, тонких экспериментов и систематических наблюдений. Эти исследования требуют больших ресурсов (финансовых, материальных и людских). По своим масштабам и затратам они превышают возможности любой страны. Поэтому необходимы соответствующие международные проекты.

#### **9.4. Итоги**

Подводя итоги, можно представить основные выводы в виде тезисов, которые в сжатой форме отражают содержание книги.

1. Приведены данные о волноводах в литосфере и астеносфере, а также о трещиноватых структурах и флюидном режиме верхней коры.

2. Дан обзор существующих представлений о волноводах литосферы и астеносферы, структурах разрушения верхней коры и происходящих в них процессах.

3. Дан анализ определяющих соотношений пороупругих, поровязких и разрушающихся сред.

4. Проведенный анализ показал, что, по всей вероятности, наибольшей интенсивностью обладает дилатансионный механизм движения флюидов в верхней коре, который дает наибольший градиент порового давления. Он является наиболее вероятным кандидатом на роль доминирующего механизма переноса флюидов в верхней коре, особенно, в холодных и тектонически спокойных регионах. При этом не исключается возможность существования и других механизмов движения флюидов.

5. На пути математического моделирования динамики флюидов в верхней коре есть объективные трудности. Однако отсутствие универсальных определяющих соотношений деформируемой и разрушающейся среды не является препятствием для практического приложения результатов этого моделирования. Это связано с тем, что методы измерения напряженно-деформированного состояния и динамики флюидов (необходимые для проверки моделей) содержат объективную информацию, которая может быть использована при решении различных прогнозно-поисковых и других прикладных задач.