

Глава 5. Природа коровых волноводов

В предыдущих главах было приведено распределение слоев с пониженной скоростью в коре и описаны их свойства. Ниже рассматриваются различные точки зрения на их природу. На начальной стадии исследования реологических свойств коры (особенно, ее нижних слоев) доминировал феноменологический подход. При больших изменениях температур и давлений (соответствующих глубинам средней и нижней коры) трудно формализовать характеристики прочностных и реологических свойств пород с помощью единой модели и достаточно адекватного математического аппарата. Поэтому ранние представления носили сугубо качественный характер. Однако они заложили основу некоторых современных взглядов, которые в большей степени опираются на физический подход и экспериментальные данные.

5.1. Возможные причины понижения сейсмической скорости в средней коре

До недавнего времени температурное влияние считалось главной причиной формирования коровых волноводов. Эта точка зрения наиболее полно представлена в работах Р. Майснера [Meissner, 1986; Meissner, Strehlau, 1982; Cloetingh, Burov, 1996]. Она исходит из термодинамических условий, формирующихся в континентальной коре на глубинах более 10 – 15 км (рис. 41). В тектонически активных регионах и на молодых плитах, где тепловой поток превышает $40 - 60 \text{ мВт/м}^2$, породы переходят на данной глубине от жесткого состояния через крип в состояние, близкое к пластичному. Естественно, что степень их пластичности зависит не только от температурного режима, но и от состава и метаморфизма пород; кислые и менее плотные породы будут обладать большей пластичностью, чем основные и высоко метаморфизованные. Возникают условия для формирования дополнительной неоднородности коры, в частности, для формирования ослабленных слоев над резкими сейсмическими границами.

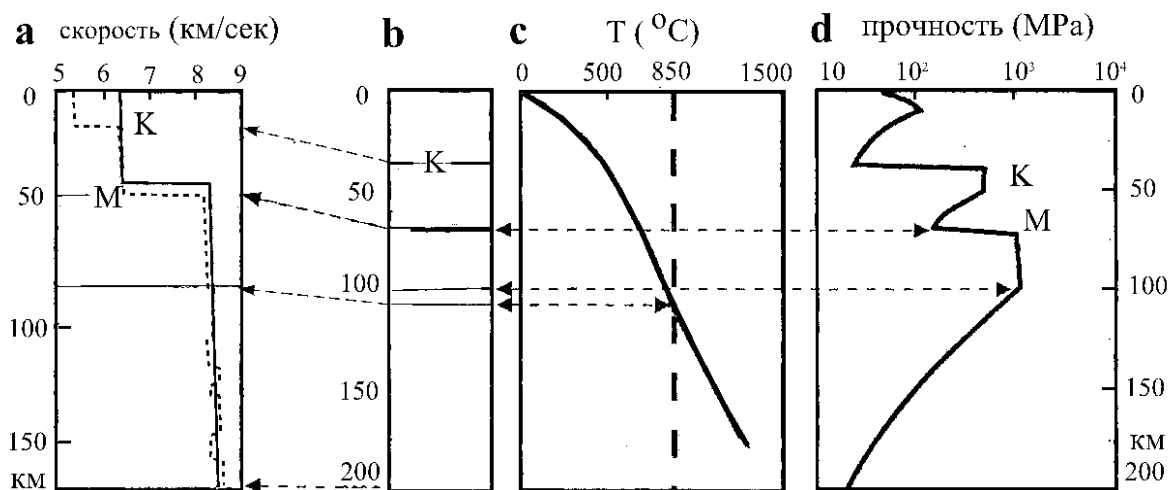


Рис. 41. Сейсмическая и реологическая модели континентальной литосферы при тепловом потоке 50 мВт/м^2 , взятые из работы [Nemeth, Hajnal, 1998]; *a* – скоростная модель континентальной литосферы по данным сейсмологии (сплошная линия) и по данным ГСЗ (пунктир), *b* – модель литосферы, принятая для расчетов (М – граница Мохо, кора разделена на два слоя границей К), *c* – расчетное распределение температуры с глубиной (пунктирная линия, соответствующая 850°C , определяет область возможного сохранения структурной анизотропии), *d* – расчетное распределение обобщенной прочности.

Ослабленные слои, в свою очередь, создают благоприятные условия для проникания в кору мантийных пород. Последние подчеркивают уже сформировавшуюся расслоенность, усложняя ее дополнительной вертикальной и горизонтальной неоднородностью. Таким образом, создаются тонко расслоенные пачки (reflectivity zones) и общая тонкая расслоенность нижней коры.

Такой подход стал общепринятым в западных странах и был исследован с разных точек зрения. Оказалось, что он хорошо согласуется с наблюдаемыми величинами скоростей в коре, тепловым потоком и геодинамическими моделями ее развития. Данное согласие достигнуто, в основном, для коры западноевропейского типа. В Западной Европе, как отмечалось, относительно тонкая кора (20 – 30 км) представлена двумя слоями со скоростью 6,0 – 6,4 км/сек и 6,5 – 6,7 км/сек со средним тепловым потоком 50 – 60 мВт/м². Температурным режимом можно объяснить также слои с пониженными скоростями в коре молодых орогенов (Кавказ, Альпы). Тепловой поток здесь повышенный, и температура в средней коре достигает величин, достаточных для уменьшения сейсмической скорости.

Однако в центральных частях континентов, включая молодые плиты, кора – толстая (40 – 45 км), и тепловой поток составляет, в основном, 30 – 40 мВт/м². Тем не менее, волноводы наблюдаются в этих регионах на той же глубине примерно 10 – 15 км. Объяснить их появление влиянием температуры невозможно. Так, новейшие исследования реологии Балтийского щита [Kukkonen, Peltonen, 1999; Glaznev et al, 1996; Kaikkonen et al, 2000] подтвердили, что глубина переходной зоны от хрупкого к пластичному режиму в архейской коре Карелии около 20 км. Следовательно, потеря прочности, вызванная разогревом земной коры, предполагается на глубине, вдвое большей, чем это следует из данных сейсмоки и геоэлектрики о слое пониженной скорости и повышенной электропроводности на глубине 10 – 15 км.

По-видимому, следует согласиться с тем, что геофизическими исследованиями выявлен "холодный" тип волноводов [Ваньян и др., 1982; Ваньян, Павленкова, 2002]. Его невозможно объяснить влиянием температуры, как в тектонически активных регионах. Действительно, на глубине около 10 км на Балтийском щите температура не превышает 150°C, что может уменьшить градиент скорости по глубине, но не может создать зону инверсии скорости. Поэтому высказывались и другие гипотезы.

Иногда свойства волноводов связывались с различиями в петрологическом составе пород, например, с наличием графитосодержащих пород. Рост же степени метаморфизма пород приводит к увеличению, а не уменьшению сейсмических скоростей. Гипотеза о петрологическом происхождении волноводов в коре наталкивается на ряд серьезных трудностей. Действительно, отдельные участки коры в процессе тектонических движений постоянно поднимаются и опускаются. Ее слои (которые первоначально имели горизонтальное простираие) наклоняются и сминаются в складки, что приводит к перемешиванию вещества коры. Между тем волноводы, как правило, выдерживаются на определенной глубине в горизонтальном положении. Все говорит о том, что они, скорее всего, связаны с состоянием вещества, а не с его составом.

5.2. Природа повышенной электропроводности в земной коре

Определение природы выявленных в земной коре слоев с повышенной электропроводностью является трудной задачей, что обусловлено многими факторами. Во-первых, как уже отмечалось выше, при МТЗ с естественными источниками невозможно определить раздельно величину проводимости и мощность проводящего слоя. Возникает некоторая неопределенность: имеем ли мы дело с тонкими высоко проводящими слоями или с достаточно толстыми слоями средней проводимости. Так, при решении

одномерной задачи зоны с удельным сопротивлением в коре 300 Ом·м и мощностью в 20 км фактически могут быть толщиной всего в 2 км с удельным сопротивлением 30 Ом·м (рис. 16).

Ясно, что ни одна из разновидностей сухих кристаллических пород, слагающих земную кору, не может создать такие слои. Как видно из рис. 15, кристаллические породы характеризуются средним удельным сопротивлением в 10^4 Ом·м. При увеличении давления и температуры до уровня 400°C эта величина уменьшается до 10^2 в кислых породах и до 10^3 в основных породах при $T = 800^\circ\text{C}$. Обобщение же данных по проводимости коры в разных регионах показывает, что величина удельного сопротивления выше нескольких тысяч Ом·м является скорее исключением, чем правилом. Типичными же величинами являются сотни Ом·м. Обычно принимается, что нормальное удельное сопротивление средней и нижней коры порядка $10^2 - 10^3$ Ом·м.

В геофизической литературе часто обсуждается вопрос о том, что же является причиной более высокой проводимости в средней и нижней коре. Эту аномалию обычно объясняют четырьмя основными факторами [Jones, 1992]: 1) наличием флюидов (рассолов), 2) карбоновыми пленками в межзерновом пространстве, 3) высокопроводящими минералами и 4) частичным плавлением.

5.2.1. Высокопроводящие минералы

В 70-ые годы было принято связывать высокую электропроводность с серпентинизированными породами, поскольку по данным лабораторных измерений эти породы обладают высокой проводимостью. Позже было показано, что в условиях средней коры амфиболовые гнейсы, содержащие структурную воду, имеют такую же проводимость, как и граниты. Правда, ориентироваться на лабораторные данные в данном случае очень сложно, потому что невозможно восстановить условия нижней коры, в частности, проходящие в ней реакции, а также фактор времени. Измерения, проведенные в течение разных отрезков времени, давали величины проводимости на несколько порядков отличающиеся: при увеличении времени обычно увеличивается и электропроводность серпентинитов.

Другой возможной причиной повышенной электропроводности средней и нижней коры могут быть графиты, тоже обладающие высокой электропроводностью. Графитовые пленки на кристаллах пород могут увеличить их электропроводность на порядок (рис. 15).

Такие пленки действительно были обнаружены в породах, и они вполне могут быть причиной высокой проводимости земной коры. Эта природа проводимости выглядит убедительно и используется многими исследователями, но возникает естественный вопрос, могут ли насыщенные графитом породы образовывать региональные слои в земной коре. Ответ зависит от того, возможно ли формирование в коре таких пленок в большом масштабе и какова их сохранность в течение длительного времени.

Возможность образования графитовых пленок зависит от глубины и температурного режима региона. На глубинах, где температура выше температуры кристаллизации породы, CO_2 исключается из этого процесса. Следовательно, породы, кристаллизующиеся на малых глубинах, не могут быть насыщены графитом.

Лабораторными исследованиями показано также, что проводимость породы зависит от размеров зерен. Мелко зернистые породы (менее 1 см) имеют удельное сопротивление менее 100 Ом·м, в то время как крупно зернистые породы (более 10 см) характеризуются удельным сопротивлением более 1000 Ом·м. В пластичной нижней коре можно ожидать крупно зернистую структуру среды. Объяснение ее высокой проводимости за счет графита выглядит мало обоснованным.

Исследования пород, содержащих графит, показали также, что их проводимость резко меняется при изменении РТ условий, и вряд ли они могут образовывать стабильные зоны высокой проводимости в течение длительного геологического времени.

Кроме того, установлено, что графит не обладает достаточной подвижностью, чтобы распространиться в процессе диффузии на большие расстояния от первоначального источника, и для объяснения возможной насыщенности графитом пород всей нижней коры нужно предположить предварительную пропитку ее флюидами, насыщенными CO_2 или CO .

Таким образом, графит может объяснить высокую электропроводность отдельных блоков коры, и, следовательно, МТЗ является наиболее эффективным методом разведки месторождений графита. Но сформировать протяженные на многие сотни километров слои в средней и нижней коре они вряд ли могут.

5.2.2. Частичное плавление

О возможности частичного плавления в нижней коре можно говорить лишь в случае тектонически активных регионов. Эта возможность определяется двумя основными факторами: температурным режимом и наличием в среде свободных флюидов. На рис. 42 оконтурены области возможного солидуса для пород габброидной группы в зависимости от температуры и от наличия или отсутствия в них флюидов. В первом случае частичное плавление в нижней коре возможно в тектонически активных регионах, где температура на глубине 20 – 30 км достигает 1200°C . Эти участки обычно занимают локальные области и хорошо объясняют магматические очаги в коре. Связывать их с протяженными слоями повышенной электропроводности, выявленными в нижней и средней коре платформенных регионов, невозможно.

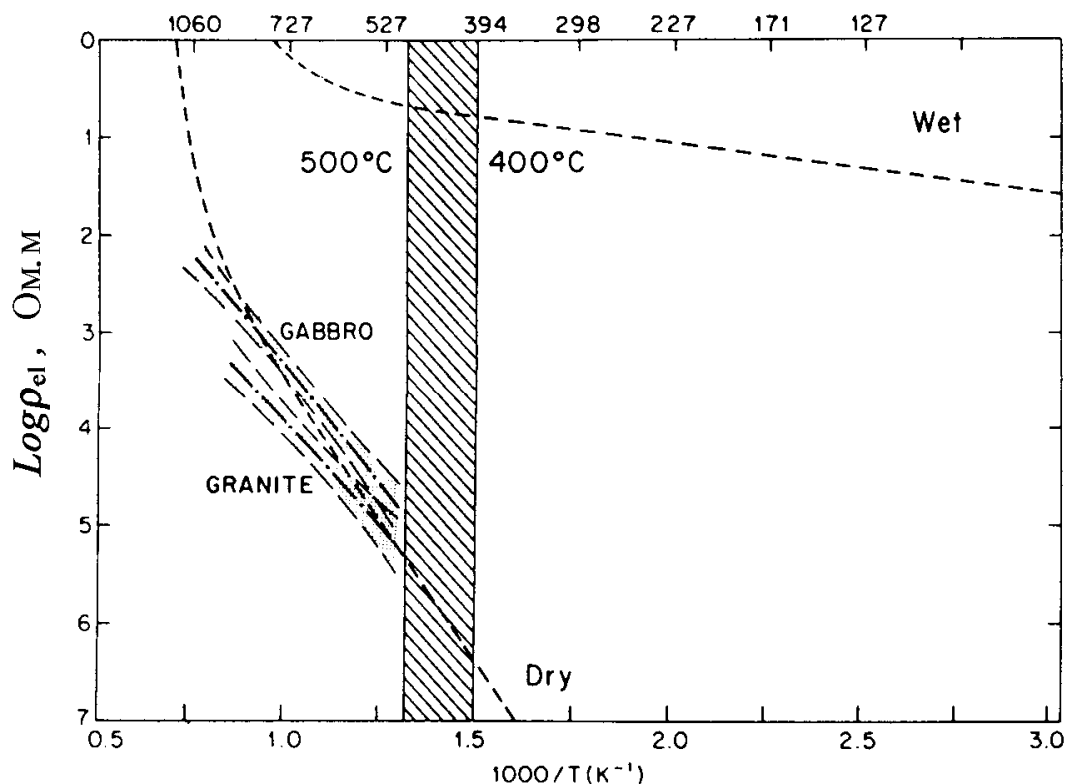


Рис. 42. Зависимость электрической проводимости от температуры для сухих и насыщенных раствором гранита и габбро. Заштрихована область температур, типичных для нижней коры ($400 - 500^\circ\text{C}$) [Shankland, Ander, 1983].

По-другому выглядят условия частичного плавления при наличии в коре свободных флюидов. Как видно из рис. 42, температура солидуса достигается на глубине 20 – 30 км уже при температуре 700°C. Такие условия можно ожидать в нижней коре в областях с тепловым потоком порядка 40 – 50 мВ/м². Они могут представлять достаточно обширные регионы. Тем не менее, они все-таки не охватывают древние платформы, где слои с повышенной электропроводностью наблюдаются не только в нижней, но и в средней коре.

Таким образом, напрашивается следующий вывод. Поскольку участки возможного частичного плавления занимают обычно локальные области, то связывать их с протяженными слоями повышенной электропроводности в нижней и средней коре достаточно трудно.

5.2.3. Свободные флюиды

Иначе оценивается влияние свободных флюидов на формирование в коре слоев повышенной электропроводности. Из рис. 15 видно, что присутствие в породе мизерных объемов воды увеличивает ее электропроводность на 5 порядков. Однако и в этом случае возникает много вопросов. Прежде всего, существуют ли вообще флюиды в коре. Если да, то каков их характер и какова их реальная электропроводность. Не менее важный вопрос заключается в том, могут ли они сохраняться в низах коры в течение длительного времени, перемещаются ли они и с какой скоростью.

Сама возможность существования флюидов в коре оценивается разными исследователями по-разному [Jones, 1992]. Практически установлено наличие в коре флюидов в тектонически активных регионах, особенно, в зонах субдукции. Их присутствие объясняется тем, что на глубине порядка 40 км в результате низко температурных реакций метаморфизма из погружившихся коровых пород выделяется большое количество воды.

Такое же происхождение могут иметь флюиды и в других регионах с повышенным тепловым потоком. В работе [Ваньян, 1996] эта проблема рассмотрена для региона Памира и Тянь-Шаня. Тепловой поток здесь повышен, и температура на подошве коры достигает 600 – 800°C. В период активизации температура здесь могла быть выше на 200 – 300°C. Многочисленными лабораторными исследованиями показано, что повышение температуры приводит к высвобождению химически связанной воды. Объем ее может достигать 1 – 2% от общего объема вещества. Такое количество воды вполне может объяснить высокую электропроводность нижней коры.

Однако приведенные соображения относятся к тектонически активным регионам. Возникает вопрос, могут ли флюиды насыщать протяженные слои в средней и нижней коре стабильных регионов, в которых температура коры не превышает 400°C и никакой субдукции не предполагается.

Мнения петрологов и геохимиков по данному вопросу противоречивы. Некоторые из них возражают против присутствия воды в нижней коре. Их возражения основаны, во-первых, на том, что ксенолиты из нижней коры не содержат свободной воды. Во-вторых, подчеркивается, что нижняя кора состоит, в основном, из пород гранулитовой фации метаморфизма, а указанные породы стабильны в присутствии флюидов лишь при высоких температурах (700 – 800°C). Температура же в кровле проводящих слоев в земной коре, как отмечалось, не превышает 400°C. Вода, пропитывающая гранулиты при такой низкой температуре, приводит к восстановлению гранулитовых пород. Соответствующие изменения были бы замечены в породах, вынесенных из нижней коры на поверхность. Однако некоторые ученые отмечают, что растворы, проникшие в кору ниже уровня перехода по-

род в пластичное состояние, не несут им существенных изменений. Возможно, этим и объясняется отсутствие указанных изменений в породах нижней коры.

По данным геохимиков в нижней коре должны присутствовать флюиды для того, чтобы обеспечить процессы метаморфизма, которые там наблюдаются. Изучение этих процессов позволило предположить и преобладающий состав флюидов на разных уровнях в коре [Jones, 1992]. Так изучение влияния флюидов на метаморфизм пород в системе С-О-Н дало основание предположить формирование в земной коре следующей зональности: насыщенная метаном верхняя кора, наличие H_2O – в средней коре и CO_2 – в нижней. Предполагается, что CO_2 поступает из мантии вместе с расплавами. H_2O перемещается на более высокие уровни из нижней коры, поскольку при температуре выше $650^\circ C$ насыщенные водой силикатные расплавы выносятся вверх. Насыщенные CO_2 расплавы проходят стадию кристаллизации при более высокой температуре (в нижней коре).

Данные о высокой электропроводности средней и нижней коры, несомненно, свидетельствуют в пользу присутствия в них свободных флюидов. Но при этом проблемы полностью не снимаются. Для объяснения высокой проводимости нижней коры необходимо предположить значительную пористость коры и содержание в ней высоко проводящих растворов. На первый план выходят проблемы существования пористости на больших глубинах и ее сохранности в течение длительного времени, а также возможной сохранности самих флюидов.

5.3. Геомеханические концепции возникновения разломов и волноводов

В предыдущих разделах было показано, что наиболее вероятной причиной существования слоев в коре и мантии с ослабленными механическими свойствами является их двухфазное состояние. Среда этих слоев является трещиноватой или пористой, насыщенной флюидом. Флюидом могут быть минерализованная вода или расплав. Возможны и *летучие*, т.е. газообразная форма флюида в коре и мантии. Именно добавление небольшого количества флюидов существенно меняет сейсмоакустические и электрические свойства пород, по которым мы судим о существовании волноводов.

Ограниченные возможности для прямого, инструментального изучения микроструктуры, состояния и динамики глубоких слоев земной оболочки повышают роль теоретических исследований. В следующих главах будет проведен анализ основ механики пористых деформируемых сред при физических условиях коры с целью математического моделирования флюидных процессов в ней. Данный раздел носит концептуальный характер. Он как бы предваряет более глубокие исследования на уровне геомеханики.

В ранних публикациях возникновение ослабленных зон в коре (и в более глубоких слоях литосферы) связывалось со снижением прочности пород [Ranalli, Murphy, 1987; Лобковский, 1988]. Понятие прочности массивов коры нуждается в некотором уточнении. Обычно в него вкладывают общепринятый в механике смысл как предел нагружения упруго-хрупкого или пластического тела. Однако определенная таким образом прочность зависит от времени, режима нагружения, а также масштаба объекта даже в небольших интервалах глубин. Другими словами, она не является паспортной характеристикой вещества. Кроме того, с глубиной меняются режим деформаций и характер разрушения. Соответственно, размывается смысл самого понятия.

По указанной причине термину *прочность* дается более широкое толкование. В частности, в условиях нелинейно-вязкого течения вводится понятие криповой прочности, соответствующей уровню девиаторных напряжений при определенной величине скорости деформаций. Вводится также т.н. *обобщенная прочность*, включающая в себя все перечисленные аспекты. Она характеризует степень податливости вещества и склонность его к разрушению в реальных условиях при соответствующих глубинах и давлениях. График

обобщенной прочности представлен на рис. 41*d* до глубин 200 км. Совершенно очевидно, что говорить о прочности в обычном смысле на таких глубинах не имеет смысла.

Однако понятие обобщенной прочности, а также другие геофизические понятия, связанные со стратификацией коры по механическим свойствам, являются общими и нечеткими. В этой связи была предложена также несколько другая точка зрения, развиваемая с конца 70-х годов В.Н. Николаевским [Николаевский, 1978, 1981, 1984*a,b*, 1996; Николаевский, Шаров, 1985; Nikolaevskii, 1990], а затем продолженная в работах А.В. Каракина [Каракин, Камбарова, 1997; Каракин, 1990*a*, 2001]. Суть ее сводится к некоторой интерпретации известных механических экспериментов по разрушению и деформированию горных пород и созданию на ее основе геомеханических моделей.

На рис. 43 схематически показана структура листрических разломов, которая была подтверждена сейсмическими методами в работах В.И. Шарова [1987]. Именно форма и глубина выполаживания листрических разломов явились толчком к исследованию режима разрушения в коре с помощью геомеханических экспериментов. Следуя В.Н. Николаевскому, можно предложить некоторую геомеханическую концепцию, которая объясняет результаты этих экспериментов и наблюдаемую структуру коры. На рис. 44 в виде графиков и схем представлена классификация режимов достижения прочности и последующего разрушения в коре в зависимости от глубины. В верхней части рисунка приведены графики изменения предела прочности, предела упругости и начала дилатансии в зависимости от давления. Последняя кривая представляет собой предельное значение сдвигового напряжения, при котором начинается дилатансионное расширение упругой среды в результате образования трещин. В нижней части рисунка на графиках и схемах соответствующих экспериментов показан характер разрушения в зависимости от давления и температуры в континентальной коре на различных глубинах.

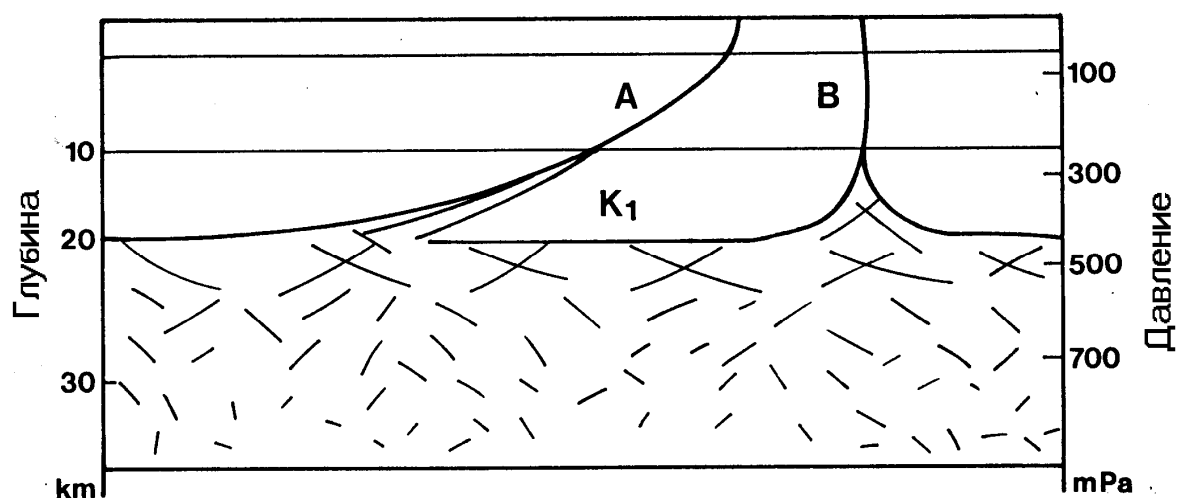


Рис. 43. Схематическое изображение нарушений в земной коре согласно концепции В.Н. Николаевского [1984*a,b*]. Кривая А соответствует листрическому разлому.

Оказывается, что с глубиной меняется лишь режим разрушения, а сам факт разрушения прослеживается достаточно глубоко, возможно, вплоть до низов коры. При малом боковом сжатии появляются трещины, параллельные сжимающему напряжению. Поэтому в верхних этажах коры поверхности разрушения имеют вид субвертикальных трещин и магистральных разрывов. Затем по мере заглубления появляется система наклонных трещин. Они обусловлены тем, что при большем обжатии образца в эксперименте появляются наклонные трещины. При еще большей глубине (когда сила кулоновского трения достигает предела прочности) возникает ситуация неустойчивого

разрушения (т.н. "stick-slip"), обусловленная разрушением материала вдоль бортов трещины.

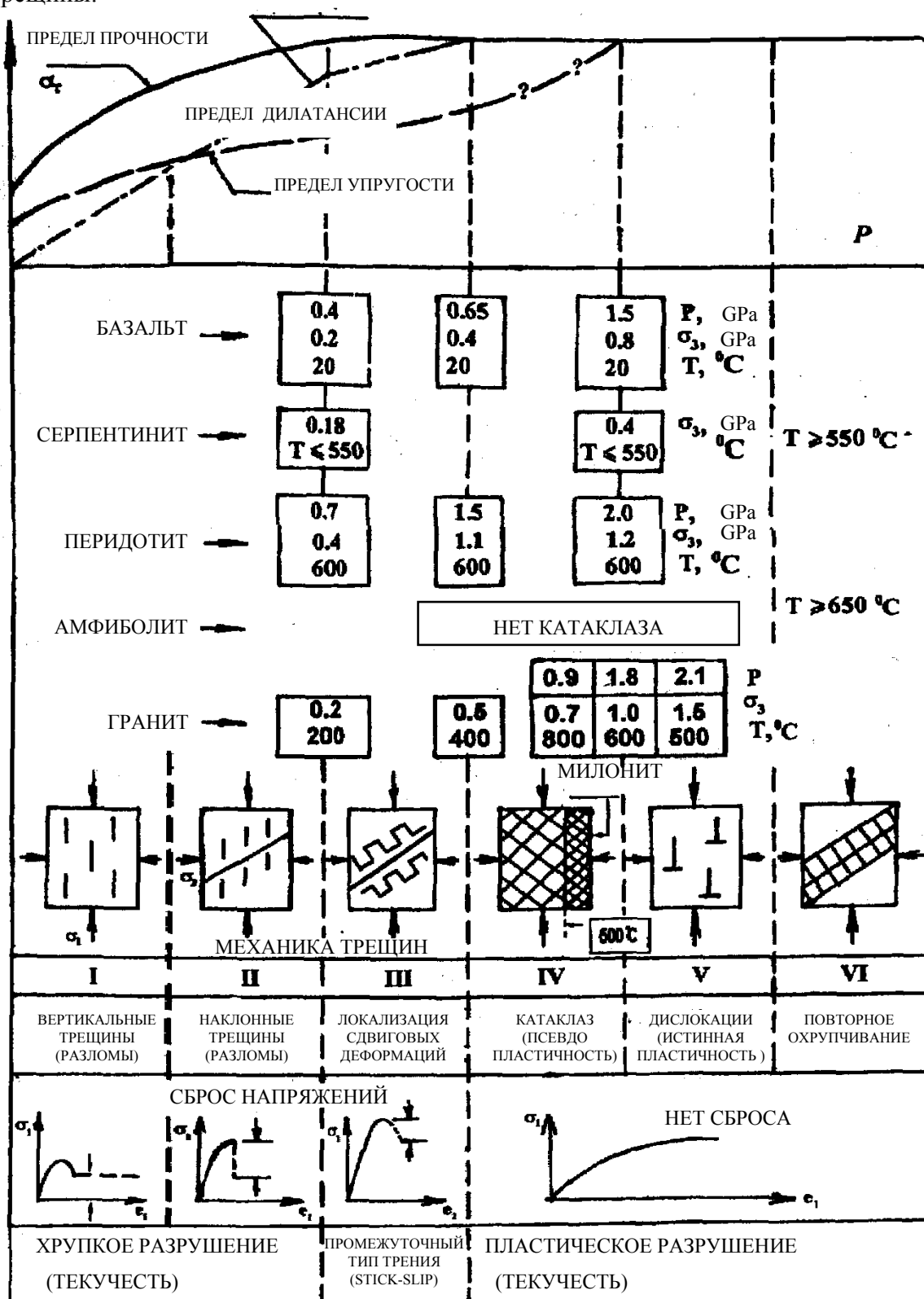


Рис. 44. Обобщенное описание хрупко-пластического разрушения геоматериалов при термодинамических условиях, соответствующих континентальной коре по В.Н. Николаевскому [1996]. Верхняя часть рисунка представляет собой кривую нагружения при малом давлении. В средней части рисунка показано изменение наклона трещины

по отношению к главным осям тензора напряжений. Нижняя часть рисунка соответствует моменту возникновения явления прерывистого скольжения в зоне волновода.

Явление прерывистого скольжения ("stick-slip") связано с наличием падающего участка на кривой характеристики скольжения. Падающий участок в законе трения обычно всегда приводит к возникновению различного рода неустойчивостей типа автоколебаний. Эти неустойчивости делают невозможным движение по узким зонам локализации деформаций и приводят в конечном итоге к появлению в определенном интервале глубин зон сплошной трещиноватости. Именно эти зоны и отождествляются с волноводами в верхней коре.

Хорошо согласуется с данной концепцией и форма листрических разломов. Изменение наклона листрических разломов связано с изменением наклона трещин при увеличении всестороннего сжатия. Расширение листрических разломов можно объяснить явлением прерывистого скольжения, которое не позволяет материалу деформироваться по узким зонам. Коровые волноводы в данной концепции отождествляются с участком неустойчивого разрушения, который начинается на верхней границе волновода и заканчивается на его нижней границе. Для условий древних платформ и, в основном, для кислого состава коры указанный интервал глубин оценивается в 10 – 15 км [Николаевский, 1981], что совпадает с глубиной сейсмических волноводов.

Проблема волноводов является частным случаем более общей проблемы стратификации коры по различным физическим и механическим свойствам. В геологической литературе указанное расслоение иногда связывают с теми или иными геологическими представлениями. К ним относятся концепция тектонической расслоенности [Пейве, 1981], а также идеи двухъярусной тектоники плит [Лобковский, 1988]. Согласно последней верхняя (более прочная) часть коры может скользить по ее нижней, ослабленной части. Двухъярусная тектоника плит позволяет объяснить наличие наблюдаемых микроблоков коры размером примерно $100 \times 100 \text{ км}^2$. Ослабление отдельных слоев коры связывается с изменением ее реологических свойств. Близкую точку зрения, но с несколько других позиций развивает С.Н. Иванов [1990]. По его мнению поровое давление в основании верхней коры существенно выше гидростатического, что приводит к понижению эффективного давления и уменьшению прочности горных пород. Ослабленные слои могут быть причиной горизонтальных подвижек верхней части коры относительно нижней.

Все эти представления, в целом, не противоречат идее В.Н. Николаевского и затрагивают лишь ее отдельные частные аспекты. Следует отметить, что в отличие от чисто геологических рассуждений, концепция В.Н. Николаевского основана на лабораторных экспериментах и включает в себя понятные физические объяснения. Она позволяет на эвристическом уровне сделать некоторые выводы о структуре коры (особенно, в ее верхней части) и о форме листрических разломов.

Тем не менее, эта концепция носит качественный характер и не подкрепляется строгими доказательствами, вытекающими из законов механики. Кроме того, она не затрагивает проблемы динамики структур разрушения. Поэтому весьма актуальным является развитие этих идей и исследование их с помощью геомеханических моделей. Такая модель (учитывающая, в частности, и динамику в зонах разрушения) была предложена как развитие точки зрения В.Н. Николаевского [Каракин, Камбарова, 1997; Каракин, 1990а, 2001]. Разрушение в листрических разломах и волноводах сопровождается дилатансионными эффектами. Оно может явиться причиной разуплотнения среды, увеличения ее пористости, а также соответствующего уменьшения скорости сейсмических волн и сопротивления электрическому току. В указанной модели были исследованы периодические процессы уплотнения и разуплотнения трещиноватых зон волноводов.

5.4. Коровый волновод по данным Кольской сверхглубокой скважины

Концепция В.Н. Николаевского была подтверждена результатами исследований сверхглубоких скважин. В районе Кольской скважины коровый волновод был выделен на глубине около 10 км по профилю "Кварц". Этот профиль начинается непосредственно от Кольской сверхглубокой скважины и пересекает архейский блок Балтийского щита. Данные о волноводе получены в непосредственной близости от скважины. Однако система наблюдений в районе самой скважины не была достаточно плотной для надежной привязки полученного разреза к самой скважине.

Первоначально на профиле были выделены два слоя с пониженной скоростью: в верхней коре на глубине около 10 км и в низах коры на глубине около 40 км. Однако надежность выделения этих слоев вызвала определенные сомнения, так как при обработке сейсмических записей применялась скоростная фильтрация [Егоркин, 1999a,b]. При шаге между приемниками в 10 км в результате такой фильтрации есть опасность получить ложные оси синфазности и, соответственно, выделить ложные слои. Для того, чтобы убедиться в достоверности коровых волноводов, была проведена вторичная обработка первичных материалов по этому профилю без применения скоростной фильтрации.

В результате оказалось, что волновод на глубине 10 км не вызывает сомнения. На рис. 12 приведен пример наиболее четких записей (с характерной для инверсии скоростей "зоной тени") Р-волн, полученных на профиле "Кварц" недалеко от скважины. Но, тем не менее, нет достаточных оснований для того, чтобы сделать вывод о существовании слоя с пониженной скоростью в низах коры.

Как отмечалось выше, определить параметры волновода даже на такой небольшой глубине, как 10 км, оказалось непростой задачей. Возможно множество решений (рис. 13). Если в первых вступлениях намечается небольшой разрыв во времени со смещением волны К1 относительно Рg примерно на 0,2 сек, то волновую картину можно объяснить наличием в коре слоя с пониженной скоростью (волновода) или слоя с постоянной скоростью (безградиентного слоя). Мы остановились на модели с инверсией скорости, так как с динамической точки зрения для объяснения значительной интенсивности отраженной волны К1 необходимо иметь резкий перепад скорости на подошве рассматриваемого слоя. Такой перепад существует только в модели с волноводом.

При выборе оптимального решения по скоростной модели волновода мы исходили из данных сверхглубокого бурения (рис. 45). Из возможных величин глубины до волновода (6 – 9 км) мы остановились на глубине в 7 км. Именно здесь по данным бурения происходит выполаживание Печенгской серии высокоскоростных пород, и они замещаются породами гранитного ряда (рис. 46). Скорость внутри волновода выбрана переменной – от 6,1 до 6,2 км/сек, что также соответствует данным Кольской скважины. Остальные параметры волновода и подстилающего его слоя были определены независимо в процессе двумерного математического моделирования.

В районе скважины были проведены и другие виды сейсмических исследований. К ним относятся детальные работы ГСЗ, проведенные еще до бурения скважины [Литвиненко и др., 1981], работы ОГТ, проведенные в кооперации с американскими специалистами [Ganchin et al., 1998], и, наконец, геолого-геофизические работы в самой скважине. Они позволили всесторонне охарактеризовать интервал глубин 7 – 12 км, в котором выделен волновод.

Первоначальная интерпретация данных ГСЗ, когда отражающий горизонт на глубине 7 км был принят за поверхность так называемого "базальтового" слоя, была ошибочна. Причина данной ошибки широко обсуждалась в 80-ые годы. Было показано

[Павленкова, 1989], что завышенные скорости были определены по последующим

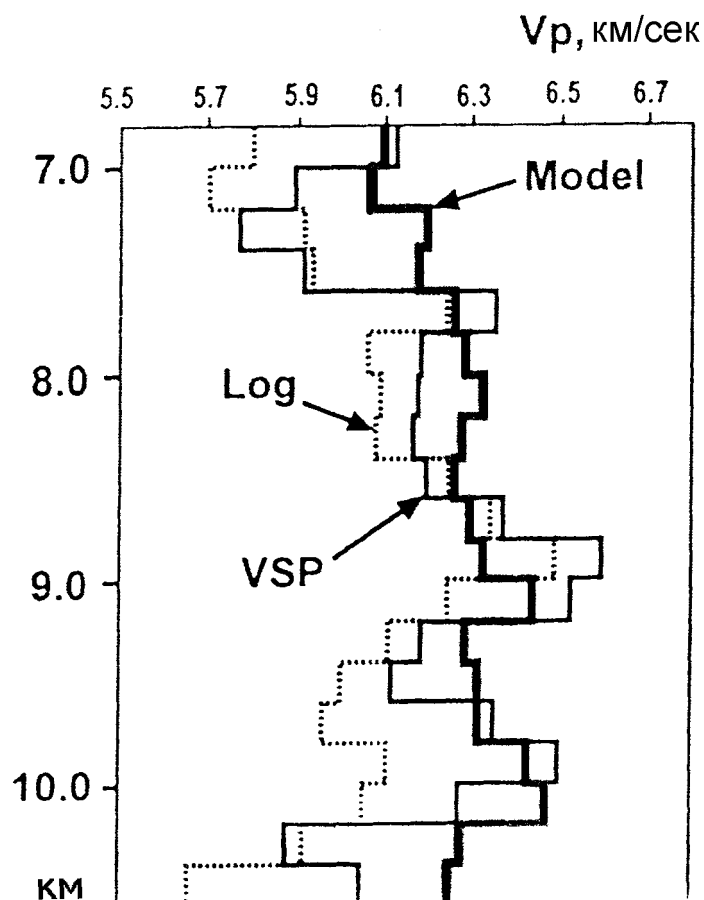


Рис. 45. Скорости сейсмических волн в породах, вскрытых Кольской сверхглубокой скважиной, по данным: Log – сейсмокаротажа, VSP – вертикального сейсмического профилирования, Model – рассчитанные для неразрушенных пород по их химическому составу [Ganchin et al., 1998].

вступлениям, которые в те годы интерпретировались как преломленные. Предполагалось, что это могут быть и закритические отражения, кажущиеся скорости которых в критических точках равны скорости преломленной волны от этой же границы. Фактически при ГСЗ регистрируются докритические отражения, кажущиеся скорости которых выше, чем у преломленной волны. Эти высокие кажущиеся скорости (до 6,4 км/сек) и были приняты за реальные пластовые скорости, типичные для основных пород. Такие величины скорости не подтвердились, однако, реальность отражающей границы K1 (вернее, расслоенной пачки) на глубине 7 – 8 км неопровержима (рис. 46).

В результате бурения были получены дополнительные характеристики указанной пачки. Оказалось, что на этой глубине наблюдаются увеличение диаметра скважины (т.е. ослабление пород), увеличение пористости и притока свободной воды. Данный факт был самым неожиданным результатом бурения. Другими словами, была вскрыта явно аномальная по физическим свойствам зона [Козловский (ред.), 1984; Минц и др., 1987].

По ряду признаков была затронута лишь кровля аномальной средней коры. Еще глубже наблюдается дальнейшее увеличение притока воды, степени разрушенности пород и их микрорасслоенности [Кременецкий и др., 1987]. Каких-либо существенных изменений в составе пород при этом не отмечено.

По результатам исследований Кольской скважины были получены прямые данные о флюидном режиме в верхах коры, и, в частности, – о влиянии свободной воды на сейсмические скорости. На глубине 4,5 км наблюдается четко выраженная зона инверсии скорости Р-волн. Однако никакого изменения пород по составу или степени метаморфизма здесь не отмечено. Единственным петрохимическим параметром, который коррелирует с этой зоной, является процентное содержание воды в минералах, резко уменьшающееся на глубине 4,5 км [Козловский, 1984]. Возможно следующее объяснение данной корреляции. При увеличении глубины и давления происходит выделение воды в свободное состояние. Последняя нуждается в пространстве, в результате чего создаются дополнительные микротрещины, вследствие чего происходит уменьшение сейсмических скоростей.

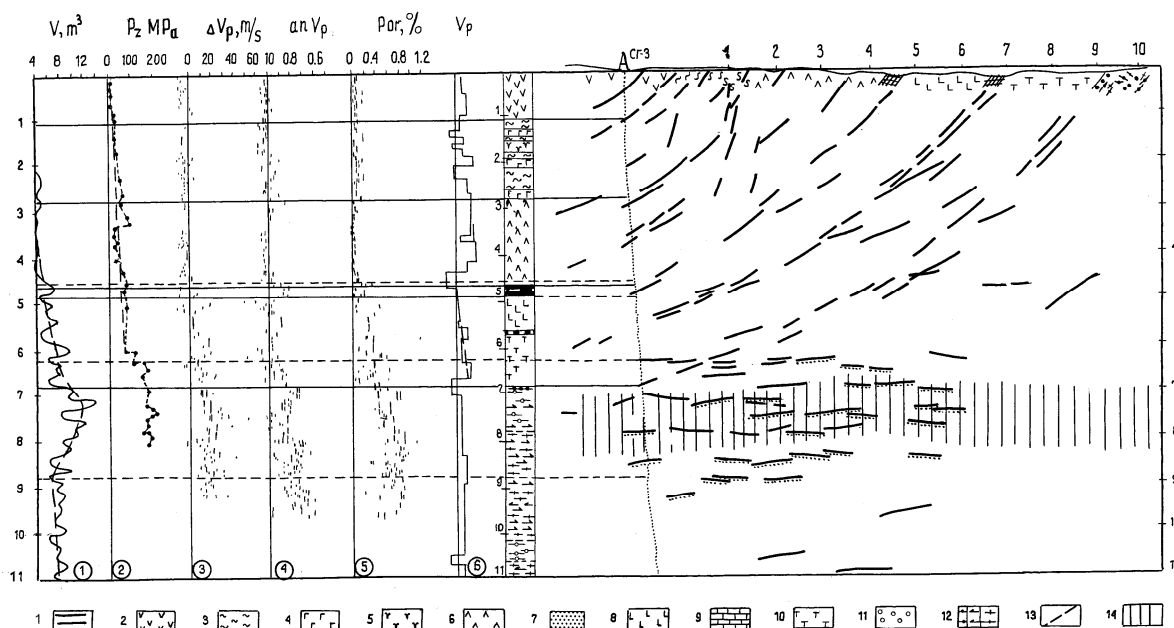


Рис. 46. Данные каротажа, исследования керна и сейсмический разрез по Кольской сверхглубокой скважине. Составлено по работам [Козловский (ред.), 1984; Кременецкий и др., 1987; Павленкова, 1989]: 1 – мигматизированные и гранитизированные биотит-плагиоклазовые гнейсы, 2 – авгитовые диабазы, 3 – туфы с прослойками, 4 – габбро-диабазы, 5 – верлиты, 6 – актинолитизированные диабазы, 7 – ритмичнослоистые песчаники с подчиненными алевролитами и филлитами, 8 – метадиабазы, 9 – доломиты, полимиктовые песчаники, 10 – диабазовые порфириды и сланцы по ним, 11 – биотит-плагиоклазовые гнейсы, 12 – магнетит-амфиболовые сланцы, 13 – тектонические нарушения, 14 – кровля волновода. Цифрами в кружочках обозначены: 1 – диаметр скважины D в см, 2 – вертикальная компонента тензора напряжений σ_{zz} , 3 – изменение скорости ΔV_p , 4 – анизотропия скорости, 5 – пористость f , 6 – скорость Р-волн V_p .

Работы ОГТ в районе сверхглубоких скважин и в других регионах щита показали, что выполаживание наклонных структур (в том числе, и разломных зон) к коровым волноводам на глубине 7 – 10 км не является случайностью. Оно представляет собой закономерную картину существования для большей части разломных зон.

Таким образом, объяснение существования слоев пониженной скорости повышенной разрушенностью пород и повышенным содержанием флюидов нашло под-

тверждение в данных глубокого бурения. Неожиданным результатом, как отмечалось, было также увеличение с глубиной пористости и притока свободной воды. Как видно из рис. 46, именно на глубине 7 – 8 км, где по детальным работам ГСЗ выделялась зона с большим числом субгоризонтальных площадок, наблюдается увеличение объема скважины, т.е. ослабление пород и увеличение пористости.

О том, что именно с увеличением пористости и притока воды связаны локальные зоны инверсии скоростей в интервале глубин 7 – 9 км, свидетельствуют и данные вертикального сейсмического профилирования (ВСП). Наблюдаемое здесь различие между скоростями, рассчитанными для данного состава пород и измеренными в результате вертикального сейсмического профилирования, объясняется разрушенностью пород и повышением содержания флюидов.

На рис. 45 приведено сопоставление скоростей сейсмических волн (определенных по данным ВСП) в породах Кольской сверхглубокой скважины в их естественном залегании на большой глубине и скоростей, рассчитанных по их химическому составу с учетом соответствующих РТ условий. Рассчитанные скорости существенно выше наблюдаемых. Следовательно, в данном диапазоне глубин породы имеют повышенную пористость, и они насыщены флюидами.

О возможной роли воды в формировании сейсмической неоднородности земной коры говорят лабораторные [Fyfe, 1985] и теоретические оценки характера ее распределения с глубиной [Gavrilenko, 1987]. На рис. 47 представлен расчетный сейсмический разрез, полученный для условий просачивания воды через верхнюю кору. Он сопоставлен с наблюдаемой картиной на примере Украинского щита (рис. 48). Сходство их настолько разительно, что флюидная природа reflectivity zones представляется реальностью.

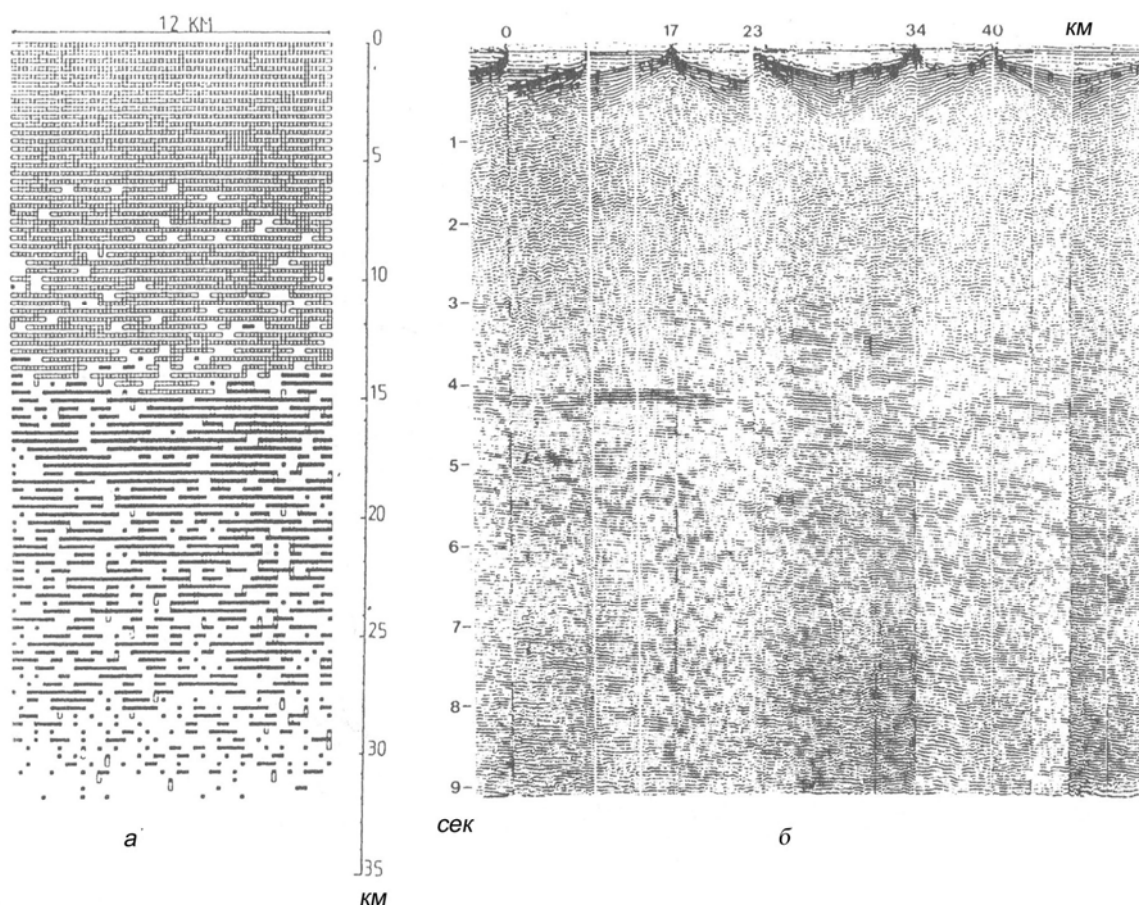


Рис. 47. *а* – теоретическая модель земной коры, рассчитанная для условий просачивания глубинных флюидов к дневной поверхности [Gavrilenko, 1987], *б* – временной разрез земной коры по данным МОВ для Украинского щита, характеризующий увеличение числа отражающих границ на времени 3 – 6 сек в области волновода [Шаров, 1987].

Влиянием флюидов можно объяснить и изменение коэффициента Пуассона в отдельных слоях reflectivity zones. По данным лабораторных исследований [Kern, 1982] установлено, что небольшое содержание свободной воды в породах приводит к изменению скоростей Р-волн, но S-скорости мало реагируют на их содержание. Именно такое соотношение между скоростями Р- и S-волн наблюдается в зонах повышенной "reflectivity" [Lushen et al., 1989].

В заключение все изложенное выше о структуре и динамике земной коры сведено на рис. 48 в виде обобщенной сейсмической модели.

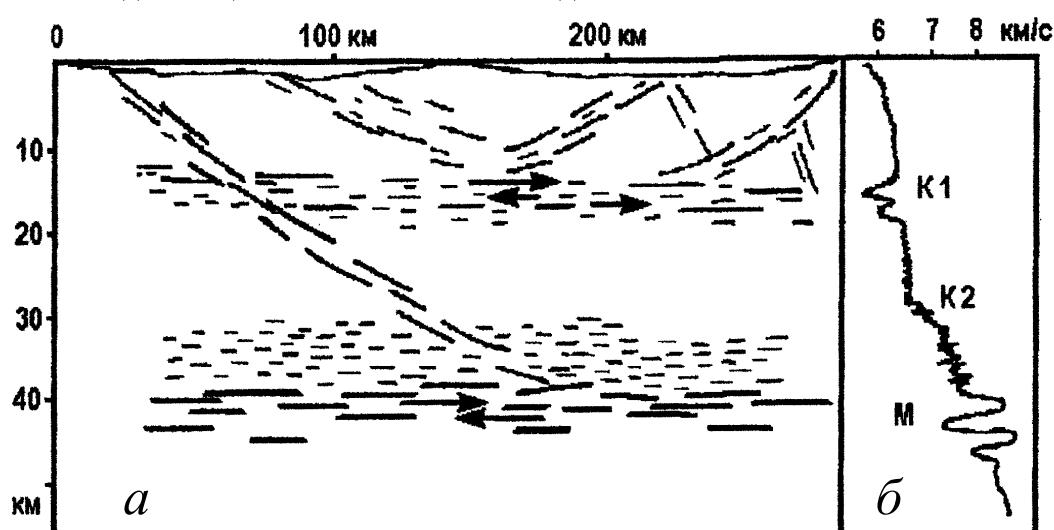


Рис. 48. Обобщенная модель земной коры платформенных регионов: *а* – структурная схема листрических разломов, выполаживающихся к расслоенным зонам волновода на глубине 10 – 20 км и к границе М, *б* – скоростная модель коры с зоной пониженных скоростей на глубине порядка 15 км и со слоистой структурой неоднородности в подошве коры на границе М. Стрелками показаны зоны возможных относительных горизонтальных смещений отдельных блоков [Павленкова, 2003].