

239
0-75

105935

3

Основные
проблемы
рифтогенеза

**НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ДЕСТРУКЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ
ПРИ РИФТОГЕНЕЗЕ**

Общий структурный план рифтовых зон определяют разломы. Изучение закономерностей их развития дает ключ к познанию природы рифтовых зон. Мы уже привыкли к тому, что каждый конкретный район характеризуется преобладанием одного-двух простираний разломов. Эти направления контролируют ориентировку рифтовых зон и отдельных их элементов.

Исследование других численных характеристик разломов убеждает нас, что направление — не единственный из постоянно выдержанных параметров. В дальнейшем будет использоваться определение количественных параметров разломов, под которыми следует понимать численное выражение их длины, глубины проникновения, амплитуды смещения, ширины зоны влияния, а также густоты расположения отдельных трещин, образующих зоны разломов. Группы разломов можно рассматривать и сравнивать между собой как единую систему только при общности их ведущих параметров. Это позволит сравнивать между собой и искать общие закономерности у структурных форм, в частности разломов, соизмеримых по масштабу проявления. Это означает, что региональные разломы не будут сопоставляться с локальными и сводиться в единую диаграмму, даже если они имеют общее простирание. В данном случае общность в простирании не говорит о сходстве других параметров (густоты, глубины проникновения, генетической общности и др.) и, следовательно, не свидетельствует о принадлежности разломов с совпадающим простиранием к одной системе.

Для понимания закона, по которому разрушается земная кора при рифтогенезе, необходимо найти близкий аналог из известных физических тел. Известно, что в зависимости от некоторых физических свойств они разрушаются по-разному. У них существуют определенные соотношения между размерами трещин и их количеством. Так, очень хрупкие тела будут давать одну-две трещины и мгновенно разрушаться, весьма пластичные, текучие — удлиняться, т. е. образовывать бесконечно большое количество бесконечно малых трещин. По тому, как разрушается тело, можно относительно оценить его вязкость. Естественно, что на характер разрушения тела серьезно влияет и скорость приложения нагрузки.

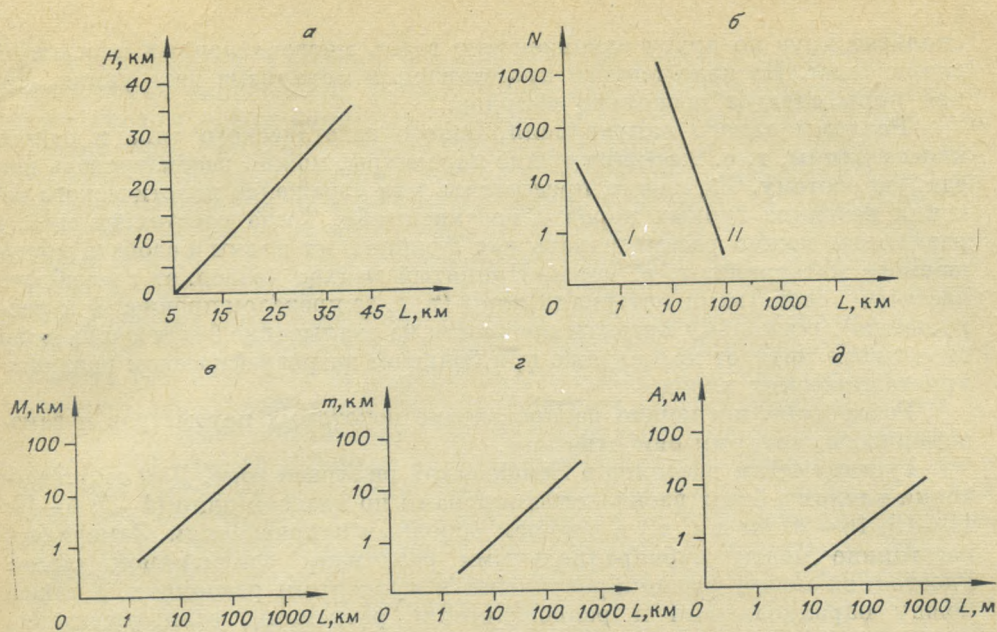
Под таким углом зрения изучено соотношение между разломами определенного класса длины и их количеством в Байкальской рифтовой зоне. При обработке материалов использованы стандартные приемы математической статистики. Корреляционный анализ более 3000 данных показал, что существует четкая зависимость между длиной разломов и их количеством, описываемая уравнением регрессии

$$L = \frac{151,4}{N^{0,42}} \quad (1)$$

при коэффициенте корреляции $r = -0,95 \pm 0,17$ (см. рисунок). Аналогичные данные получены по ряду других районов (Шерман, 1975). Тенденция в соотношении между длиной определенной группы разломов и количеством разломов в ней подчиняется общей закономерности, описываемой уравнением вида

$$L = \frac{a}{N^b}, \quad (2)$$

где L — длина разломов, N — их количество, a — коэффициент пропорциональности, зависящий от максимальных длин разломов, участвующих



Взаимосвязь основных параметров разломов.

а, б — для Байкальской рифтовой зоны (I — на 1 км², II — для зоны); в, г, д — обобщенные графики для активизированных зон земной коры. Н — глубина, км, N — количество, m — зона влияния, км, A — амплитуда смещений разломов, м, M — расстояние между ними.

в выборке, б — коэффициент пропорциональности, определяемый физическими свойствами горных пород (или скоростью деформирования) и равный $\sim 0,4$.

Полученное соотношение позволяет сделать вывод, что при формировании сетки разломов, т. е. при мега- и макроразрушении горных пород в естественных условиях, независимо от степени тектонической активизации проявляются некоторые общие закономерности.

Физический смысл установленной связи становится ясным при сопоставлении полученных данных с результатами (к сожалению, пока малочисленными и широко не описанными в литературе) экспериментального изучения зависимости между длиной трещин и их числом в телах, обладающих разными свойствами (Кузнецова, 1969). При разрушении тела Максвелла кривая, отражающая соотношение между длиной трещин и их количеством, идентична аналогичной кривой, полученной по анализу количественного распределения разломов разных длин в областях с различной тектонической историей развития и степенью активизации. Последнее позволяет сделать второй более общий вывод: при формировании разломов земная кора ведет себя как тело Максвелла. Отсюда вытекают некоторые теоретические и практические следствия.

Обычно при исследовании механизма образования разломов использовались представления и законы идеально упругого тела Гука. Возможно, такой вывод справедлив при анализе отдельных дислокаций. В региональном же и более крупных по площади масштабах динамику развития сетки разломов в рифтовых зонах, как и в других районах высокой активизации, необходимо рассматривать, опираясь на поведение материала земной коры как упруговязкого тела.

Для такого тела применимы законы, характеризующие течение материала в сложном напряженном состоянии (Надаи, 1969), по первому из которых следует, что в деформируемом теле направления наибольших приращений деформаций сдвига совпадают с мгновенными направлениями максимальных касательных напряжений. Пластическое состояние твердых материалов можно представить себе следующим образом: части среды

скользят друг по другу одновременно вдоль многочисленных плоскостей скольжения. Из изложенного представления механизма деструкции земной коры следует несколько выводов.

Разломы одного направления, одного генетического типа и одного класса длины, т. е. имеющие общие параметры, можно рассматривать как единую систему. Их можно представить как отражение пластического течения вещества горных пород в мегамасштабе. Тогда расстояние между разломами можно рассматривать как функцию их длины и свойств разрушаемого материала, т. е. коры. Принятый подход позволяет пренебречь частными свойствами материала коры (т. е. ее пределом прочности к разрушению), поскольку пределы прочности на скалывание будут очень мало отличаться друг от друга даже при большом петрографическом различии кристаллических пород.

Рассмотрим численное распределение некоторых параметров и закономерности, которым они отвечают.

Густота сетки разломов в Байкальской рифтовой зоне. Для ее определения разломы были расклассифицированы по классам длин (1—5; 6—10; 11—15, 16—20 км и т. д.) и четырем основным направлениям. Замерялось расстояние между субпараллельными разломами соизмеримой длины. Расстояния между эшелонированными и кулисными разломами, а также между параллельными и равновеликими разломами, если расстояние между ними превышало 2—3 длины, не учитывались.

Дифференцированная по направлениям статистическая обработка 541 наблюдения позволила установить наличие тесной корреляционной связи (коэффициент корреляции $r = 0,9 \pm 0,05$) между длиной разломов и расстоянием между ними M , описываемой уравнением регрессии вида:

$$M = (0,29L \pm 1,74) \text{ км.} \quad (3)$$

Внимательное изучение распределения точек на графике показывает, что с ростом разломов изменяется соотношение (3). Прямая зависимость меняется на более сложную. Это соотношение справедливо при длинах разломов от 1 до 35 км.

Недавно К. Юэри и И. Мицутани (Jairi, Mizutani, 1969) при исследовании системы разломов Восточно-Африканской рифтовой системы в районе оз. Танганьика обратили внимание на общую зависимость между порядком длин разломов и интервалов между ними. Исследованию подверглись дизъюнктивы длиной от нескольких сантиметров до первых сотен километров. Данные этих исследователей для соответствующих интервалов хорошо совпадают с зависимостями, установленными для Байкальской рифтовой зоны. Расчет уравнений регрессии позволил получить общую формулу, описывающую связь длины разломов L ($L \approx 1 + 300$ км) и интервалов между ними M , подтверждающую параболический характер зависимости, описываемый уравнением

$$M = 0,44L^{0,95}. \quad (4)$$

При коэффициенте корреляции $r = 0,98$ для логарифмов коррелируемых пар. Намечаемые соотношения были проверены на ряде других объектов (Шерман, 1975). Оказалось, что разломы, формирование которых генетически связано с подкоровым энергетическим источником, подчиняются ряду закономерностей. В частности, разломы заданной длины могут «сгущаться» только до определенных пределов, которые можно считать критической плотностью. Превышение ее ведет к нарушению единства в протяженности структур, установленного уравнением (2).

Физическое объяснение выявленной эмпирической связи можно найти при анализе полей напряжений, образующихся вокруг разломов. Дислокация создает в окружающих ее областях самоуравновешивающуюся

поле напряжений, в котором выделяются зоны относительного повышения и снижения напряжений. Новый разлом (дислокация) соизмеримой длины с первым может появиться только в зоне относительного повышения напряжений. Расстояние между субпараллельными и параллельными разломами одного класса длины контролируется распределением полей напряжений, которые не могут перекрывать друг друга в полном объеме.

Небезынтересно отметить, что Д. Н. Осокиной и Н. Ю. Цветковой (Шамина и др., 1973) по результатам исследования распределения напряжений крупного разрыва на окружающую среду установлено, что область формирования нового крупного разрыва, параллельного первому, вероятнее всего, будет находиться в пределах бокового максимума напряжений первого разрыва, т. е. на расстоянии $0,4 \div 0,8L$ от первого разрыва. Соотношения (3) и (4) хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

Полученный общий вывод не противоречит нашему повседневному опыту: чем меньше и короче разломы определенного направления, тем с большей вероятностью следует ожидать повышения их густоты, т. е. тем чаще они встречаются. Слабая тектоническая деятельность может привести к более редкой сети разломов, но, наоборот, максимальное усиление ведет лишь к сгущению до определенного предела. При этом пропорция связи между длинными и короткими разрывами на всех стадиях эволюции рифтогенеза сохраняется. Отсюда же следует, что в поле напряжений рифтовой зоны рост и удлинение разломов по простиранию происходят дифференцированно. Это означает, что определенный разлом в общем рифтовом поле напряжений может приостановиться в своем развитии по простиранию, если параллельно расположенный с ним дизъюнктив такого же ранга длины «начал удлинение» с некоторым опережением во времени. Неодинаковое распределение эпицентров землетрясений в зонах активных разломов в рифтовых зонах служит веским дополнительным аргументом.

Реальность предположения подтверждена высокой корреляционной связью (коэффициент корреляции $r = 0,73$) между средними длинами разломов и средними глубинами гипоцентров, установленной для Байкальской рифтовой зоны (Шерман, Лобацкая, 1972). Зависимость между обсуждаемыми параметрами описывается уравнением регрессии

$$H = (1,04L - 0,7) \text{ км}, \quad (5)$$

где L — средняя длина разлома, км; H — средняя глубина гипоцентров или активного проникновения разлома в земную кору. Уравнение рекомендуется использовать при $L \approx 1 + 25$ км. При таких длинах отношение H/L близко к 1 (см. рисунок).

С геологической точки зрения наличие корреляции между средними длинами разломов и средними глубинами гипоцентров свидетельствует также и о том, что большая часть локальных и региональных разломов рифтовой зоны активизирована в кайнозой независимо от возраста и заложения. Зависимость (5) экстраполировать на большие глубины нельзя. С чисто физической стороны, экстраполируя на глубины, превышающие нижние границы коры и уходящие в мантию, мы сталкиваемся с двумя серьезными осложнениями: 1) пересекается устойчивая и четко выраженная горизонтальная сейсмическая граница коры и мантии; 2) разлом, входя в верхнюю мантию, сечет вещество с существенно отличающимися физическими свойствами. Найти уравнение математической связи $H = f(L)$ для очень протяженных зон разломов в рифтовых зонах, используя сейсмологические данные, в настоящее время затруднительно.

Тесная корреляционная связь между средними длинами разломов и средними глубинами гипоцентров в Байкальской рифтовой зоне раскрывает еще одну деталь общей закономерности деструкции земной коры при рифтогенезе. Можно показать тесную корреляционную связь между рядом других параметров разломов, а также геологическими процессами, ими обусловленными (см. таблицу).

Взаимосвязь между основными параметрами разломов земной коры

| Основные параметры | Уравнения взаимосвязи параметров | | |
|---|---|--|---|
| | Байкальская рифтовая зона | Общая закономерность для земной коры | Пределы колебаний значений коэффициента пропорциональности |
| Длина разломов (км) и глубина их активного проникновения H (км) | $H \approx 1,04L - 0,7$ $L \approx 0,5H + 5,35$ | | |
| Длина разломов L (км) и их количество N по площади исследований | $L = \frac{151,4}{N^{0,42}}$ | $L = \frac{a}{N^e}$ | a зависит от длины разломов, участвующих в выборке: $e \approx 0,4$ |
| Число разломов n заданной длины l (км на км ²) | $l = \frac{0,78}{N^{0,4}}$ $n = \frac{0,29}{l^{2,2}}$ | | |
| Оптимальное расстояние M между разломами заданной длины L ($L \approx 300$ км) | $M = 0,29L + 1,74$ | $M = 0,44L^{0,95}$ (для континентальных рифтовых зон) | $K \approx 0,3 - 0,5$ |
| Оптимальное расстояние M' (см) между трещинами длиной l (см) | $M' = 0,16l^{0,85}$ | $M = KL^c$ | $c \approx 0,5 - 0,95$ |
| Амплитуда смещения a (км) в зависимости от длины L ($L \approx 1$ км) | $a = 0,08L^{0,77}$ | $a = K'L^s$ | $K' \approx 0,01 \div 0,8$ $s \approx 0,8 \div 1,2$ |

Анализ всего комплекса данных по количественному взаимоотношению параметров разломов однозначно свидетельствует о закономерности процесса медленного дробления коры при рифтогенезе, отвечающего законам упруговязкого течения материала коры.

В деталях, по вертикальному разрезу (сечению) коры и даже в различных местах по латерали, течение материала коры осуществляется по-разному.

С этой точки зрения рассмотрим некоторые вопросы формирования крупных разломов земной коры, поскольку именно они определяют основные рифтогенные формы и являются зонами локальной повышенной относительной «текучести» коры.

Глубинные разломы земной коры состоят из серии сближенных региональных и локальных трещин. Смещение по разлому можно представить как сумму элементарных подвижек по серии кулисно расположенных последовательных трещин. Величина образуемых элементарных трещин зависит от скорости деформирования. При медленном воздействии медленно развиваются трещины с приблизительно равными размерами. При быстром воздействии материал становится очень чувствительным к неоднородностям, и на наиболее сильных из них развиваются избранные трещины, а тело разделяется на отдельные неравные части прежде, чем его общая деформация достигает заметных размеров. Известные нам данные о трещиноватости во внутренней зоне позволяют сделать заключение о медленном развитии и разрастании крупных разломов в рифтовых зонах. Таким образом, зоны разломов — зоны повышенного квазитечения вещества при рифтогенезе.

С другой стороны, известно, что с глубиной гомогенность среды увеличивается и уменьшается время релаксации, при этом количество мелких трещин также уменьшается. Время релаксации отражает вязкость среды. Говоря о вязкости реальной неоднородной среды, следует иметь в виду ее квазивязкость — способность к деформации с определенной скоростью под действием определенных напряжений, обусловливаемую внутренними физическими механизмами разных порядков — от межзернового скольжения до макро-трещин. При деформации микрообъектов трещины играют двойную роль: с одной стороны, участвуют в общем перемещении масс, увеличивая квазивязкость, с другой — служат источником сейсмических актов. Слаботрещиноватая среда (относительно однородная) является одновременно и средой с повышенной квазивязкостью. Таким образом, развитие мелкой трещиноватости способствует релаксации напряжений вблизи более крупных трещин и разломов и, в свою очередь, ускоряет их рост. «Недостаток» мелкой трещиноватости повышает однородность и затрудняет релаксацию. Следовательно, кроме эффективной вязкости среды η , на роль которой указывал М. В. Гзовский (1963), для понимания процесса формирования глубинных разломов земной коры и рифтогенеза в целом необходимо принимать во внимание реальную «квазивязкость». В верхних горизонтах земной коры ее роль весьма значительна.

Ю. В. Ризниченко (1965) разработал вопрос о сейсмическом течении горных масс, которое в существенной мере происходит за счет квазивязкости среды. При этом тектоническое течение, максимальное в зонах разломов, можно представить как течение несжимаемой ньютоновской жидкости.

Таким образом, если снижение эффективной вязкости материалов уменьшает время релаксации и, следовательно, способствует реализации напряжений путем пластической деформации, то снижение «квазивязкости» способствует формированию крупных разломов земной коры даже в условиях относительно медленной происходящих деформаций. Отсюда вытекает очень важная закономерность специфики развития разрывов в земной коре. При прочих равных условиях одни и те же напряжения, связанные с постоянно однонаправленными медленными деформациями земной

коры, будут вызывать в нижней части разреза коры пластическое течение, в верхней части — квазитечение материала. Увеличение скорости деформации увеличит глубину возникновения квазивязкого течения и «уменьшит» общую мощность слоя, вовлеченного в пластическое деформирование. В этом можно найти физическое объяснение вертикальной зональности глубинных разломов. Отсюда же вытекает вывод о постоянном развитии в рифтовых зонах крупных разломов земной коры даже в те периоды, когда снижается активизация и уменьшается абсолютное значение растягивающих напряжений в коре.

Представление о глубинных разломах как мощных зонах плосконого ламинарного течения горных пород находит геологические и геофизические подтверждения. Е. И. Паталаха (1971 и др.) в ряде работ привел убедительные геологические примеры течения вещества и снижения его вязкости в зонах разломов.

Таким образом, в отличие от локальных дизъюнктивов глубинные разломы с физической точки зрения следует рассматривать как зоны квазипластического и пластического течения вещества на субповерхностных и глубинных уровнях соответственно. Квазивязкое течение состоит из серии быстрых и медленных подвижек и представляет собой многоимпульсный процесс, фиксируемый линейно-вытянутыми зонами сейсмичности.

Сетка разломов в Байкальской рифтовой зоне, как и в некоторых других континентальных рифтовых зонах Земли, а также в районах с несколько иной историей тектонического развития подчиняется строгим и вполне определенным закономерностям. Они описываются законами разрушения земной коры как упруговязкого тела. Возможно, из известных стандартных физических тел наиболее близко к такому приближается тело Максвелла.

Представление об упруговязком разрушении земной коры при рифтогенезе в сочетании с изменением вязкости по вертикальному сечению коры дает объяснение специфике утонения коры при рифтогенезе и образованию «шейки». При этом верхняя часть земной коры разрушается с образованием блоковых структур, нижняя — «растягивается» или течет. Если этот процесс рассмотреть в более частных деталях, то скорость растекания вещества коры в рифтовой зоне будет различной в зависимости от деталей структуры субстрата. В зонах генеральных разломов она будет больше благодаря пониженной квазивязкости, а также будет больше и под впадинами, где кора быстрее утоняется и, следовательно, при прочих равных условиях напряжения выше. В конечном итоге эти процессы будут приводить к формированию сложной крупной мегатрещины в осевой части эволюционирующей рифтовой зоны.

Неодинаковые скорости современных движений земной коры в различных структурных позициях континентальных рифтовых зон находят объяснение при связи этих процессов с вязкостной неоднородностью субстрата.

Итак, деформация и разрушение земной коры при рифтогенезе происходят по законам упруговязкого тела. При этом количественные соотношения между параметрами разломов закономерно взаимосвязаны. Скорости деформации земной коры в пределах рифтовой зоны изменяются в зависимости от вязкости и квазивязкости субстрата, относительная величина которой определяется степенью дробления.

ЛИТЕРАТУРА

- Гзовский М. В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. 3 и 4. М., Изд-во АН СССР, 1963. 544 с.
- Кузнецова К. И. Закономерности упруговязких тел и некоторые возможности приложения их к сейсмологии. М., «Наука», 1969. 87 с.
- Падаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. М., «Мир», 1969. 863 с.

- Паталаха Е. И. О роли разломной тектоники в некоторых геологических процессах с тектонофизических позиций.— В кн.: Тектоника и деформация Казахстана. Алма-Ата, «Наука», 1971, с. 109—130.
- Ризниченко Ю. В. О сейсмическом течении горных масс.— В кн.: Динамика земной коры. М., «Наука», 1965, с. 56—63.
- Шамина О. Г., Осокина Д. Н., Томашевская И. С., Воларович М. П., Цветкова Н. Ю., Павлов А. А., Гуценко О. И., Степанов В. В., Кудряшова В. В. Модельные и экспериментальные исследования разрушения и связанных с ним процессов.— В кн.: Предвестники землетрясений. М.: ВИНТИ, деп. № 5498, 1973, с. 28—60.
- Шерман С. И. Разломы Байкальской рифтовой зоны (структурный и тектонофизический анализ). Автореф. докт. дис. Новосибирск, 1975. 62 с.
- Шерман С. И., Лобацкая Р. М. О корреляционной зависимости между глубинами гипоцентров и длиной разрывов в Байкальской рифтовой зоне.— «Докл. АН СССР», 1972, т. 205, № 3, с. 578—581.
- Jairi F., Mizutani Sh. Fault system of the Lake Tanganyika rift at the Kigoma area, Western Tansania.— «J. Earth Sci.», Nagava Univ., 1969, v. 17, p. 71—95.

С. В. Крылов

О ПОЛОЖЕНИИ ГРАНИЦЫ МОХОРОВИЧИЧА В ЗОНАХ СОВРЕМЕННОГО РИФТОГЕНЕЗА

Сейсмическая поверхность М, соответствующая глобальному разделу кора — мантия, имеет первостепенное значение практически во всех глубинных геолого-геофизических построениях. По массовым данным глубинного сейсмического зондирования в стабильных районах континентов и океанов установлены устойчивые сейсмические характеристики границы М. Скорость распространения продольных волн вдоль нее обычно мало отклоняется от величины 8,1 км/с. Во многих случаях, особенно на континентах, этой границе соответствуют характерные записи преломленных и отраженных волн. Большая устойчивость этих характеристик привела к представлению о границе М как об опорной, очень надежно выделяемой поверхности. Положение осложнилось в последнее время, когда стали широко изучаться недра тектонически активизированных областей, в том числе зон рифтогенеза, где вследствие интенсивных тектонических процессов глубинное вещество имеет аномальные физические свойства.

С помощью метода взрывной сейсмологии под всеми изученными океаническими и материковыми рифтовыми системами выявлен мощный (до нескольких десятков километров) слой с аномальными, не типичными ни для коры, ни для верхов мантии значениями скорости продольных волн, равными в преобладающем числе случаев 7,3—7,8 км/с. Для срединных хребтов Индийского (Удинцев и др., 1970) и Атлантического (Le Pichon e. a., 1965) океанов, Исландии (Зверев и др., 1975) в основном характерны величины 7,0—7,6 км/с; для Восточно-Тихоокеанского поднятия (Le Pichon e. a., 1965)—7,4—7,7 км/с. В континентальных зонах (Байкальской, Восточно-Африканской, Рейнской и североамериканской провинции бассейнов и хребтов) преобладают несколько более высокие значения —7,6—7,8 км/с (Крылов и др., 1975). Аномальный слой подстилается породами с нормальной для верхов мантии скоростью 8,1—8,2 км/с.

Где проводить, по сейсмическим данным, подошву земной коры? Использование признаков, установленных для неактивизированных районов, приводит к разным решениям. Так, в Байкальской зоне, основываясь на волновых признаках, которые практически не меняются при переходе от стабильной Сибирской платформы к зоне активизации, за границу М принята кровля аномального слоя, что привело к выделению обширной области с пониженной скоростью (7,6—7,8 км/с) на поверхности мантии (Пузырев и др., 1974). Точно так же ранее были истолкованы данные