

29  
17-78

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

108192 ВОСТОЧНО-СИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ АН СССР

**ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ  
ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ  
ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

Иркутск, 1978

Ю. А. Зорин, Н. А. Логачев, С. И. Шерман

### ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

Изучение Байкальской рифтовой зоны ведется достаточно давно. На первом этапе исследования выполнялись в основном геологическими и геоморфологическими методами преимущественно сотрудниками Института земной коры СО АН СССР (Павловский, 1948; Флоренсов, 1960). Позже, с развитием в Институте геофизических подразделений, эти исследования стали комплексными. Особенно они активизировались с 1966 г., когда при Институте была создана, возглавленная Н. А. Флоренсовым, Байкальская региональная секция Научного Совета по комплексным исследованиям земной коры и верхней мантии при ОГГГ АН СССР, призванная координировать все работы по изучению Байкальского рифта в рамках международного проекта «Верхняя мантия», а затем — «Геодинамического проекта». С этого периода в исследования активно включаются Институт геологии и геофизики СО АН СССР (Н. Н. Пузырев, И. В. Лучицкий, С. В. Крылов, В. Н. Гайский, и др.) и Восточный геофизический трест Мингео РСФСР (М. М. Мандельбаум, В. И. Поспеев, В. П. Горностаев и др.).

За эти годы было изучено осадочное наполнение впадин и кайнозойский магматизм (Логачев, 1968), соотношение новейшей структуры с древней (Замараев и др., 1972), разломная тектоника (Шерман, 1977), сейсмотектоника и сейсмичность (Солоненко и др., 1966, 1968) механизм очагов землетрясений (Мишарина, 1967), изостазия и глубинное строение (Зорин, 1966, 1971; Голенецкий, Новомейская, 1975; Очерки ..., 1977), геотермия (Лысак, 1968; Лысак, Зорин, 1976). Большой вклад в изучение глубинного строения внесли работы Восточного геофизического треста и Института геологии и геофизики (Горностаев и др., 1970; Крылов и др., 1972; Пузырев и др., 1974) и сотрудников Иркутского университета (Булмасов, 1967). Было проведено экспериментальное моделирование одного из возможных механизмов формирования рифтовых впадин (Лучицкий, Бондаренко, 1967).

В эти же годы проведено изучение современных движений земной коры геодезическими методами. Серия повторных нивелировок и триангуляционных ходов на специально избранных геодинамических полигонах позволила составить схематическую карту современных движений земной коры и впервые, пожалуй, на основании инструментальных наблюдений дать оценку угла горизонтального поворота Сибирской платформы по отношению к Прибайкалью (Фотиади и др., 1970; Есиков, Панкрушин, 1969; Колмогоров, Колмогорова, 1977).

Результаты этих комплексных исследований значительно пополнили наши знания о Байкальской рифтовой зоне, что позволило на новом уровне перейти к разработке основных положений геодинамической модели рассматриваемого природного явления. Такая разработка представляет сложную задачу. В настоящей работе мы анализируем основные черты деформации земной коры в Байкальской рифтовой зоне и природу тектонических сил, вызывающих эту деформацию.

Впадины Байкальской рифтовой зоны образовались и продолжают развиваться за счет растяжения земной коры. На это указывают как наличие нормальных сбросов и сдвиго-сбросов в их ограничениях (Флоренсов, 1960; Шерман, 1975), так и сейсмологические данные о механизме очагов землетрясений (Мишарина, 1967).

В мировой литературе континентальные рифты обычно описываются как сложные, нередко длительно развивающиеся грабены. Действительно, ограничивающие их разломы производят большое впечатление и предопределяют направление и структуру рифтовой зоны в целом. Однако Е. В. Павловский (1948) и Н. А. Флоренсов (1954, 1960) уже давно отмечали постоянное сочетание в поверхностной структуре впадин Байкальской рифтовой зоны разрывных нарушений с пластическими изгибами кристаллического фундамента. Геофизические данные о структуре поверхности фундамента под осадками (Булмасов, 1967; Зорин, 1971; Очерки ..., 1977) подтвердили правильность такой точки зрения. На большинстве разрезов через рифтовые впадины эта поверхность описывается пологими, вогнутыми дугами, которые лишь в отдельных местах, как правило, в одном из бортов впадин, нарушаются разломными уступами.

Земная кора под впадинами утонена по сравнению с прилегающими районами горных хребтов. Этот вывод впервые был сделан на основании анализа гравиметрических материалов (Зорин, 1966, 1971). Судя по данным ГСЗ (Пузырев и др., 1974), под наиболее глубокой частью Байкальской впадины мощность земной коры составляет 34 км, в то время как под островом Ольхон и на противоположном берегу Байкала этот параметр возрастает до 42—44 км.

Сочетание утонения коры с пластическим стилем морфоструктуры свидетельствует именно о том, что земная кора здесь растягивается пластически с образованием структур типа «шейки». Разломы, ограничивающие рифтовые впадины, очевидно, не являются глубинными в понимании А. В. Пейве (1956), а затухают в нижней части коры, где ее материал более пластичен. В пользу этого свидетельствуют сравнительно небольшая глубина гипоцентров землетрясений и их корреляция со средними длинами разломов и глубинами их активного прогибания (Шерман, Лобацкая, 1972). Земная кора может рассматриваться как тело с горизонтально слоистой неоднородной структурой. Деформация такого тела происходит по сложным законам. Если рассматривать крайние граничные условия, то приповерхностная часть коры деформируется и разрушается как тело Гука, а ее нижняя часть — как вязкое тело Ньютона. В целом же, для общих построений земную кору можно рассматривать как упруго-вязкое тело Максвелла (Надаи, 1954, 1969; Ушаков, Красс, 1972; Шерман, 1977).

О возможности моделировать кору рифтовой зоны такой средой (телом Максвелла) свидетельствует также характер повторяемости землетрясений и общая картина проявления афтершоков, сопровождающих крупные сейсмические события (Пшенников, 1965). Общее растяжение земной коры, обеспечиваемое конвекционным подкоровым течением, неравномерно деформирует земную кору. Она интенсивнее растягивается на узких участках, соответствующих рифтовым впадинам. Главная причина заключается в локальном снижении вязкости в местах развития впадин. Последнее объясняют данные геотермии,

согласно которым повышения теплового потока отмечаются практически только в пределах рифтовых впадин (Лысак, Зорин, 1976). Следовательно, здесь кора наиболее разогрета, в связи с чем ее вязкость понижена.

С другой стороны, математическое моделирование показывает, что источниками наблюдаемых геотермических аномалий являются сравнительно узкие вытянутые тела. Они, видимо, соответствуют интрузиям мантийного вещества, проникшим в земную кору по ослабленным зонам вблизи осей рифтовых впадин.

Таким образом, весь процесс образования рифтовых впадин может быть представлен следующим образом. При растяжении вначале возникает, либо обновляется докайнозойский глубинный разлом. Поступающее в его полость мантийное вещество, кристаллизуясь, восстанавливает сплошность коры и разогревает ее на сравнительно узком участке, который, в связи с понижением вязкости горных пород, приобретает способность деформироваться пластически. Повышенная способность к упруго-пластической деформации вызывает некоторое утонение коры и образование «шейки». По мере охлаждения земной коры в центре «шейки» может возникнуть новый разлом и весь процесс повторится. Судя по результатам математического моделирования нестационарного температурного поля, можно полагать, что последнее внедрение крупных трещинных интрузий, в частности, под Байкалом произошло 2—3 млн. лет тому назад, что совпадает с временем верхнеплиоценовой активизации тектонических движений.

В этой схеме, учитывающей результаты комплексных геолого-геофизических исследований, континентальный рифтогенез выступает как сложный процесс, в котором сочетаются разрывные и пластические деформации глубоких зон земной коры. Однако стадии существования открытого разрыва коры, видимо, гораздо менее продолжительны, чем стадии образования «шейки» в сплошной разогретой среде, и поэтому, в структуре впадин преобладают черты пластической деформации, а на ее границах, преимущественно в верхней части коры, — упругой деформации и квазихрупкого разрушения. Нужно отметить, что ограничивающие мелкие впадины сбросы и сдвиго-сбросы не имеют, очевидно, прямого отношения к глубинным разломам, с которых начинается образование более крупных впадин (Байкальской, Тункинской, Баргузинской и др.), а представляют собой явление иного порядка, осложняющее общий стиль тектоники в верхней, наименее разогретой части земной коры.

Под действием силового поля, связанного с новейшей активизацией, могли образовываться новые глубоко проникающие разломы и обновляться древние. Видимо, именно в приспособлении к древним (докайнозойским) разломам и заключается основная причина согласованности простираний рифтовых впадин и древних структур в центральной и юго-западной частях рифтовой зоны (Замараев и др., 1972; Ружич, 1975). Интересно также, что в центральной (по простиранию) части зоны, где согласованность простираний наиболее полная, расположена самая глубокая Байкальская впадина. В рассматриваемом месте рифтовая зона развивалась в полосе древнего краевого шва, Сибирской платформы. Земная кора здесь была сильно нарушена, что обусловило раннее внедрение мантийного вещества, интенсивный разогрев коры и резкое уменьшение ее вязкости. В связи с этим в южной части Южного Байкала образовалась раньше других впадин рифтовая зона и развивалась более интенсивно (Логачев и др., 1974). Следы самых ранних внедрений мантийного вещества в кору, видимо, являются обнаруженные на острове Большой Ушканий А. С. Ескиминскими А. А. Бухаровым небольшие тела авгититовых порфиритов, абсолютный возраст которых по ряду калий-аргоновых определений

(С. Б. Брандт, Институт земной коры) оценивается около 50 млн. лет. Это — пока единственное датированное кайнозойское проявление глубинного вещества на Байкале. При довольно обширных полях базальтового вулканизма, как известно, не обнаруживается его пространственной связи со впадинами. Удоканское и Витимское поля базальтов смещены к юго-востоку относительно оси Саяно-Байкальского сводового поднятия и, в частности, Байкальской рифтовой зоны. Только Саяно-Хамардабанское поле, будучи гораздо более обширным, охватывает впадины Тункинской ветви, насыщая их разрез многими базальтовыми покровами.

Возникает вопрос, почему мантийное вещество, которое, как предполагается, образует трещинные интрузии в коре под всеми крупными рифтовыми впадинами, не во всех случаях достигает земной поверхности в пределах этих впадин? Ответ на этот вопрос может заключаться в допущении, что вещество мантии, внедряющееся в кору, в большинстве случаев слабо дифференцировано. Оно, видимо, представляет собой смесь малого количества жидкой (базальтовой) фазы с твердой (дунит-лерцолитовой). Такая «каша» обладает более высокой плотностью, чем земная кора, и в условиях растяжения в силу законов гидростатики, как правило, не может достичь земной поверхности. Вулканическая деятельность может проявиться либо в случае отделения значительных порций базальта, либо в случае возникновения локальных участков сжатия. Учитывая сложность движений и конфигурацию отдельных блоков коры, мы вполне можем допустить, что при общем господстве растяжения в отдельных местах может создаваться обстановка сжатия. Это тем более вероятно, что практически во всех местах Байкальской рифтовой зоны фиксируются деформации, связанные с относительно большими или меньшими сдвигами коры.

Мы полагаем, что источником растягивающих сил в земной коре рифтовой зоны является горизонтальное растекание вещества аномальной мантии (Зорин, 1971; Шерман, 1971; Артюшков, 1972). Область аномальной мантии под Байкальской рифтовой зоной обнаружена глубинными сейсмическими зондированиями (Пузырев и др., 1974). Как и в других регионах подобного типа, граничная скорость сейсмических волн на разделе Мохо здесь оказалась равной 7,7—7,9 км/с, в то время, как на Сибирской платформе этот параметр оценивается в 8,1—8,2 км/с. Выполненный В. А. Рогожиной (Рогожина, 1977; Очерки ..., 1977) анализ времени запаздывания сейсмических волн далеких землетрясений, регистрируемых станциями Прибайкалья, показал, что аномальные свойства (пониженная скорость) сохраняются до глубины порядка 400—600 км. Область аномальной мантии отмечается под обширной площадью горных сооружений Южной Сибири и Монголии. Ее поверхность воздымается до подошвы коры только в пределах рифтовой зоны и, возможно, Восточного Саяна. В других частях рассматриваемого региона эта поверхность расположена на глубинах 100 и более км.

Низкоскоростную неоднородность можно трактовать как раздув астеносферы. Однако маловероятно, что возникла она за счет процессов, происходивших в самой астеносфере. Скорее всего она образовалась благодаря поступлению с больших глубин аномального по своей плотности и по температуре вещества, отделившегося из нижней мантии в результате гравитационной дифференциации. Такое вещество нарастило астеносферу и вызвало воздымание ее кровли до подошвы коры. Это поднятие образовалось либо путем проплавления литосферы, либо путем ее механического замещения веществом ослабленного слоя. Видимо, в таком раздуве астеносферы, в свою очередь происходит гравитационная дифференциация, благодаря чему под корой накапливается более легкое вещество. Такой «поплавок» вызы-

ваает изостатическое воздымание, т. е. образование сводового поднятия. Однако любое изостатически уравновешенное возмущение на сферически симметричной Земле стремится растечься в горизонтальном направлении в связи со стремлением механической системы к минимуму гравитационной энергии. Растекание верхней части вещества аномальной мантии в стороны генерирует растяжение в земной коре, под действием которого формируются рифтовые впадины. В принципе такое растекание должно было бы привести и к уменьшению высоты сводового поднятия. Однако, судя по результатам повторных нивелировок, сводовое поднятие продолжает расти. Это явление можно объяснить постоянным подтоком с больших глубин аномального вещества под земную кору рифтовой зоны. Именно, благодаря такому непрерывному подтоку, наблюдается сосуществование сводового поднятия с рифтовыми впадинами, а также высокая современная сейсмическая активность и некоторые другие геологические процессы (высокая фоновая зараженность гелием, активная гидротермальная деятельность и др.). По мере затухания и ослабления подкорового конвекционного потока будет происходить и сглаживание типичных для активного рифтогенеза геоморфологических форм. У древних рифтов морфологически выраженные высокие «плечи» должны исчезнуть.

Судя по конфигурации области аномальной мантии, ее вещество растекается преимущественно в сторону Забайкалья. С этим, видимо, и связана общая асимметричность структур Байкальского рифта и смещение полей базальтов к юго-востоку (Зорин, 1971; Очерки ..., 1977).

Нижняя часть области аномальной мантии, расположенная ниже нормального (свойственного стабильным регионам) уровня существования астеносферы, не может оказывать непосредственного механического воздействия на литосферу, так как вещество астеносферы, в силу пониженной вязкости, не может передавать значительных однонаправленных напряжений.

Конфигурация области аномальной мантии, общий рисунок рифтовой зоны в плане, смена механизма очагов землетрясений на ее западном и восточном окончаниях позволяют полагать, что местные горизонтально ориентированные растягивающие силы, направленные почти вкост генерального простирания рифтовой зоны, сочетаются с силами горизонтального сжатия, ориентированными в направлении юго-запад — северо-восток. Эти силы мешают интенсивному развитию собственно рифтовых впадин на флангах зоны.

Е. В. Артюшковым (1972) предложена формула, позволяющая оценивать напряжения растяжения, которые возникают в коре при действии рассмотренного выше механизма. Эти силы пропорциональны высоте свода. Максимальные растягивающие напряжения в рифтовой зоне (около  $400 \text{ кг/см}^2$ ) отмечаются в Баргузинско-Северобайкальском и в Кадаро-Удоканском районах, где высоты свода максимальны. В районе дельты р. Селенги, где высоты свода минимальны, эти напряжения не превышают  $100 \text{ кг/см}^2$ . Однако здесь наблюдается наибольшая глубина рифтовой впадины. Это еще раз подчеркивает, что размещение и развитие впадин внутри рифтовой зоны определяется не только величиной напряжений, но и механическими свойствами коры, на которые обращалось внимание выше.

Основываясь на преобладании черт пластической деформации структуре коры рифтовых впадин, в качестве обобщенного параметра характеризующего свойства коры, нетрудно оценить кажущуюся вязкость. Основываясь на некоторых допущениях, можно выразить вязкость коры через результат деформации — глубину впадин. Такое описание свойств коры оказывается весьма полезным. Если рассчитать энергию, затрачиваемую в единицу времени на деформацию блока земной коры со стандартной площадью  $1000 \text{ км}^2$  по значениям напря-

жений и вязкости, то этот параметр обнаруживает довольно высокую степень статистической связи с сейсмической энергией, выделяемой с этой же площадки в тот же отрезок времени. Такая связь свидетельствует о принципиальной приемлемости геодинамической модели, предложенной для описания континентального рифтогенеза и, видимо, позволяет в будущем более обоснованно прогнозировать уровень сейсмической активности в различных районах Байкальской рифтовой зоны.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Артюшков Е. В. Происхождение больших напряжений в земной коре.— *Изв. АН СССР*, серия «Физика Земли», 1972, № 8, стр. 2—25.
- Булмасов А. П. Некоторые результаты геофизического изучения Прибайкалья.— В кн.: *Геологические результаты геофизических исследований в Сибири и на Дальнем Востоке*. М., «Наука», 1967, с. 360—371.
- Голенецкий С. И., Новомейская Ф. В. О мощности земной коры по наблюдениям сейсмических станций Прибайкалья.— В кн. *Байкальский рифт*. Новосибирск, «Наука», 1975, с. 81—94.
- Горностаев В. П., Михалевский В. И., Поспеев В. И. Глубинные магнитотеллурические зондирования на юге Сибирской платформы и в зоне Байкальского рифта.— *Геология и геофизика*, 1970, № 4, с. 111—118.
- Есиков Н. П., Панкрушин В. К. Современные горизонтальные движения Западного Прибайкалья и некоторые вопросы их изучения.— В сб.: *Проблемы четвертичной геологии Сибири*. М., «Наука», 1969.
- Замараев С. М., Шерман С. И., Ружич В. В., Мазукабзов А. М. Влияние древней структуры юга Восточной Сибири на развитие Байкальской рифтовой зоны.— В сб.: *Геология Восточной Сибири (научная информация)*, Институт земной коры, Иркутск, 1972, с. 15—18.
- Зорин Ю. А. О глубинном строении впадин озера Байкал по геофизическим данным.— *Изв. АН СССР*, серия геологическая, 1966, № 7, с. 75—85.
- Зорин Ю. А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. М., «Наука», 1971, 168 с.
- Крылов С. В., Мишенькин Б. П., Петрик Г. В. Об изучении верхов мантии методом ГСЗ в Байкальской рифтовой зоне.— В кн.: *Вопросы сейсмичности Сибири*. Новосибирск, изд. ИГиГ СО АН СССР, 1972, ч. 1, с. 5—15.
- Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П. Современные движения земной коры в Байкальской рифтовой зоне.— В кн.: *Роль рифтогенеза в геологической истории Земли*. Новосибирск, «Наука», 1977.
- Логачев Н. А. Осадочные и вулканогенные формации Байкальской рифтовой зоны.— Сб.: *Байкальский рифт*. М., «Наука», 1968, с. 72—101.
- Логачев Н. А., Антощенко-Оленев И. В. и др. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М., «Наука», 1974, 359 с.
- Лучицкий И. В., Бондаренко П. М. Эксперименты по моделированию сводовых поднятий Байкальского типа.— *Геотектоника*, 1967, № 2, с. 3—20.
- Лысак С. В. Геотермические условия и термальные воды южной части Восточной Сибири. М., «Наука», 1968, 120 с.
- Лысак С. В., Зорин Ю. А. Геотермическое поле Байкальской рифтовой зоны. М., «Наука», 1976, 91 с.
- Мишарина Л. А. Напряжения в земной коре в рифтовых зонах. М., «Наука», 1967, 137 с.
- Надан А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. I. М.—Л., 1954, 648 с., т. 2. М., «Мир», 1969, 864 с.
- Очерки по глубинному строению Байкальского рифта. Коллектив авторов, ред. Н. А. Флоренсов. Новосибирск, «Наука», 1977, 152 с.
- Павловский Е. В. Сравнительная тектоника мезокайнозойских структур Восточной Сибири и Великого рифта Азии и Аравии. *Изв. АН СССР*, серия геол., 1948, № 5, с. 25—38.
- Пейве А. В. Общая характеристика, классификация и пространственное расположение глубинных разломов. Главнейшие типы глубинных разломов.— *Изв. АН СССР*, сер. геол., 1956, № 1, с. 90—105.
- Пузырев Н. Н., Мандельбаум М. М., Крылов С. В., Мишенькин Б. П., Крупская Г. В., Петрик Г. В. Глубинное строение Байкальского рифта по данным взрывной сейсмологии.— *Геология и геофизика*, 1974, № 5, с. 155—167.
- Пшенников К. В. Механизм возникновения афтершоков и неупругие свойства земной коры. М., «Наука», 1965, 87 с.
- Рогожина В. А. Некоторые особенности строения верхней мантии под Байкальской рифтовой зоной и прилегающими к ней территориями.— В кн.: *Роль рифтогенеза в геологической истории Земли*. Новосибирск, «Наука», 1977.

Ружич В. В. Влияние древних разрывов на развитие новейших структур Байкальского рифта.— «Геология и геофизика», 1975, № 1, с. 130—135.

Солоненко В. П., Тресков А. А., Курушин Р. А., Мишарина Л. А., Павлов О. В., Пшенников К. В., Солоненко М. А., Фомина Е. В., Хилько С. Д. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья. М.: «Наука», 1966, 230 с.

Солоненко В. П., Тресков А. А., Жилкин В. М., Зорин Ю. А., Коростин П. В., Курушин Р. А., Павлов О. В., Пшенников К. В., Фомина Е. В., Хилько С. Д., Хромовских В. С., Шмотов А. П. Сейсмическая тектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья. М., «Наука», 1968, 218 с.

Флоренсов Н. А. О роли разломов и прогибов в структуре впадин байкальского типа.— В кн.: Вопросы геологии Азии. Т. I, М.—Л., изд. АН СССР, 1954, с. 670—685.

Флоренсов Н. А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М., Изд. АН СССР, 1960, 258 с.

Флоренсов Н. А., Логачев Н. А. К проблеме Байкальского рифта. БМОИП, отд. геол., 1975, т. 50, № 3, с. 70—80.

Фотиади Э. Э., Каратаев Г. И., Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П., Ларионов В. А., Мурзина Г. А., Черемисин В. Г., Сардарян А. С. Байкальский геодинамический полигон. Новосибирск, ИГиГ, 1970, 175 с.

Ушаков С. А., Красс М. С. Сила тяжести и вопросы механики земных недр Земли. М., «Недра», 1972, 156 с.

Шерман С. И. Механизм образования и основные этапы развития Байкальской рифтовой зоны.— Изв. Вост.-Сиб. отд. Геогр. об-ва СССР, т. 68, Иркутск, 1971, с. 40—56.

Шерман С. И. Динамика развития разломов Байкальской рифтовой зоны.— В кн.: Проблемы рифтогенеза. Иркутск, 1975, с. 36—37.

Шерман С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск, «Наука», 1977, 102 с.

Шерман С. И., Лобацкая Г. М. О корреляционной зависимости между глубинами залегания гипоцентров и длиной разрывов в Байкальской рифтовой зоне.— ДАН СССР, 1972, т. 205, № 3, с. 578—581.