

С.И.Шерман, Р.М.Лобацкая

О НИЖНЕЙ ГРАНИЦЕ АКТИВНОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ РАЗЛОМОВ В ЗЕМНУЮ КОРУ

Вопрос о глубине проникновения разломов в земную кору давно привлекает внимание геологов. Его практическая значимость не требует обоснований и пояснений. Подход к определению глубины проникновения разломов различен у специалистов отдельных отраслей геологических знаний. Так, в разведочной геологии при подсчете запасов полезных ископаемых, контролируемых жильными телами трещинного типа, используется правило Гувера, из которого следует, что наиболее вероятная глубина жильного тела численно равна или превышает половину его длины по простиранию. Ю.Я.Вашилов (1971), рассматривая вопрос о нижней границе проникновения разломов, полагает, что последняя тяготеет к горизонтальным сейсмическим границам в земной коре. Тектонисты, кому в силу своей специализации необходимо непосредственно заниматься этим вопросом, обычно исходят из общих геологических соображений и распределения продуктов магматической деятельности. Считается, что разломы, контролирующие основную магму, являются преимущественно глубинными; разломы, контролирующие продукты кислой магматической деятельности, представляют собой структуры преимущественно корового заложения. Внутри же группы разломов корового заложения интервал глубины их активного проникновения вообще не обсуждается.

В группу разломов корового заложения практически входят все региональные разломы — наиболее распространенные в количественном отношении дизъюнктивные структуры, влияющие на большинство локальных геологических явлений.

Авторы подошли к разрешению поставленного в названии статьи вопроса путем использования данных сейсмологии и некоторых вопросов физической теории образования разрывов.

Известно, что возникновение разрывных нарушений сопровождается высвобождением энергии в виде землетрясений (Гзовский, 1970; Костров, 1970; Кузнецова, 1969 и др.). Это мнение основано на наблюдаемых на земной поверхности разломах, сопровождающих землетрясения, а также на том, что последние приурочены к зонам разломов. Так, например, в Прибайкалье — в области активного современного тектогенеза, почти все эпицентры тяготеют к зонам разломов, а математическая обработка эпицентров вне зависимости от геологического строения показывает, что центры тяжести скопления эпицентров образуют полосы, преимущественно согласные с генеральным простираем основных разломов или даже совпадают с ними (Пшенников, 1970). В то же время в йозойские впадины развиваются в местах, где допалеозойский фундамент наиболее раздроблен, т.е. скопление эпицентров землетрясений совпадает с местами ступенчатости разрывных нарушений.

М.В. Гзовский (1970) считал, что формирование более или менее крупного разрыва происходит в несколько стадий. Начинается оно с образования серии мелких разрозненных трещин, которые затем объединяются в одну крупную неровную поверхность разрушения сложной формы с искривлениями и резкими изломами. Разрыв возникает под действием поля напряжений и сопровождается выделением сейсмической энергии. Зарождение крупных разрывов возможно лишь в областях максимумов напряжений, которые появляются в промежутках между первоначально возникшими более мелкими разрывами и возле их окончаний (Гзовский, 1963, 1970).

Скопление очагов землетрясений наиболее вероятно приурочено к концам разрывов, поскольку именно они являются концентраторами напряжений (Гзовский, 1970; Костров, 1970 и др.). Следовательно, глубины залегания гипоцентров как бы фиксируют нижнюю границу пронахождения разломов в земную кору. Аппрок-

симируя очаги землетрясений до точечных размеров, можно считать их условно приуроченными к концам ранее образованных или развивающихся разрывов. Наличие корреляции между глубинами гипоцентров и длинами разрывов позволило бы определить вероятные нижние границы активного проникновения разломов в земную кору.

Ввиду того, что практически невозможно связать положение того или иного гипоцентра или их группы с определенным разломом, был использован путь сопоставления средних глубин гипоцентров со средней длиной известных на поверхности молодых или древних, но обязательно обновленных в кайнозой разломов.

В качестве полигона было выбрано Прибайкалье — область, в которой до настоящего времени происходит активное формирование разрывных нарушений, сопровождающееся многочисленными коровыми землетрясениями.

Для установления корреляционных связей между тектоническими и сейсмическими параметрами вся территория Прибайкалья была условно разбита на конкретно ограниченные участки прямоугольной формы размером 40° по широте и 1° по долготе, что примерно соответствует 60×75 км. Выбор названного трафарета не случаен. Мощность земной коры Прибайкалья по геофизическим данным оценивается в среднем в 35–40 км (Голенецкий, 1961; Крылов и др., 1970; Зорин, 1971) под впадинами и 40–50 км под хребтами, т.е. при большем радиусе осреднения (>70 км) выделялись бы явления большего масштаба, связанные с подкоровыми процессами, соответственно при меньших размерах трафарета (<35 км) могли выявиться детали, происхождение которых вызвано локальными неоднородностями строения коры. С другой стороны, выбор названного трафарета диктовался и известной средней длиной разрывов (L), которая не превышает, как правило, первых десятков километров (табл.2), а также и погрешностью в определении эпицентров. Естественно, что размеры трафарета не должны быть меньше указанной погрешности, а она иногда достигает величины ± 10 км (класс б). В основу обработки фактического материала легли государственные геологические карты среднего масштаба.

Определение средней длины разрывов производилось следу-

шим образом. газрывные нарушения различных направлений группировались на 13 классов в зависимости от азимута простирания. Принцип деления на классы проиллюстрирован в таблице I. Средняя длина разрывов, характеризующая "квадрат" осреднения, подсчитывалась как среднее арифметическое из средних длин разрывов 13 классов. У ветвящихся разломов учитывались отдельные прямолинейные отрезки. Разрывы, длина которых не превышала 0,5 км, не принимались во внимание.

Т а б л и ц а I

Принцип классификации разрывов по направлениям в Байкальской рифтовой зоне

Классы	Интервал азимутов простирания разрывов	Классы	Интервал азимутов простирания разрывов
I	270° - 280°	УШ	6° - 20°
II	281° - 295°	IX	21° - 35°
III	296° - 310°	X	36° - 50°
IV	311° - 325°	XI	51° - 65°
V	326° - 340°	XII	66° - 80°
VI	341° - 355°	XIII	81° - 90°
VII	356° - 360°		
	0° - 5°		

Полученные средние длины разломов необходимо было сопоставить со средними глубинами гипоцентров, характеризующими соответствующий "квадрат" осреднения. Если определение длин разломов производилось вполне однозначно, то с определением средних глубин гипоцентров возникают некоторые трудности.

В сейсмологии для нахождения глубины очага применяется несколько способов: засечек, гипоцентральных, изохрон, по разности прихода волн \bar{S} и \bar{P} и другие (Архангельский и др., 1954). Нами использовались данные, полученные в лаборатории региональной сейсмичности Института земной коры СО АН СССР за 1967, 1968, 1969 гг. Определение гипоцентров данной лабораторией производится способом "прямоугольного треугольника" - очаг -

эпицентр - станция (Голенецкий и др., 1970). Приборами станций (не менее двух) определяется эпицентральное расстояние (Δ), причем эпицентр может быть определен лишь в случае, если $\Delta \leq 50$ км; гипоцентральное расстояние (D), разность времен прихода на станцию волн \bar{S} и \bar{P} для каждой из них отдельно ($t_{\bar{S}\bar{P}} - t_0$).

t_0 - начальный момент землетрясения;

$t_{\bar{S}\bar{P}}$ - время прихода на станцию волн S и P .

Глубина гипоцентра (h) определяется по формулам (Голенецкий и др., 1970):

$$h^2 = D^2 - \Delta^2; \quad h = \sqrt{D^2 - \Delta^2},$$

где: $D = V_{\bar{S}}(t_{\bar{S}} - t_0)$; $D' = V_{\bar{P}}(t_{\bar{P}} - t_0)$.

$$h_{\bar{S}} = \sqrt{[V_{\bar{S}}(t_{\bar{S}} - t_0)]^2 - \Delta^2}; \quad h_{\bar{P}} = \sqrt{[V_{\bar{P}}(t_{\bar{P}} - t_0)]^2 - \Delta^2},$$

где: $h_{\bar{S}}$ - глубина гипоцентра, определенная по волнам

$h_{\bar{P}}$ - глубина гипоцентра, определенная по волнам P .

При этих расчетах некоторое число наблюдений дает мнимую глубину очага, которая является результатом случайных ошибок в определении времен прихода волн \bar{S} и \bar{P} на ближайшие станции, и физического смысла не имеет. Как учитывать эти данные?

С.И.Голенецкий (1970) полагает, что при подсчете средних глубин очагов (H) необходимо учитывать как действительные, так и мнимые значения, считая ошибку в определении тех и других равноценной. А.А.Гресков (1968) считал, что чем меньше отношение h/Δ , тем менее надежны определения глубины очага, а мнимые значения, получаемые при установлении гипоцентра не только не надежны, но и как не имеющие физического смысла при подсчете не должны учитываться. Ю.А.Ризниченко предложил авторам статьи приравнивать мнимые значения нулю, чтобы условно придать им физический смысл.

Нами была подсчитана средняя глубина гипоцентров по каждому отдельному "квадрату" всеми выше перечисленными приемами. Значения полученных величин приведены в таблице 2. Статистической обработке было подвергнуто 1315 разрывов. Количество определений гипоцентров колебалось от 1615 при вычислении H_3 (средние глубины гипоцентров без учета мнимых значений) до

Таблица 2

Средняя длина разрывов и средняя глубина гипоцентров по квадратам осреднения в Байкальской рифтовой зоне

№ квадрата	Колич. оп-рдел. длин разломов	Средняя длина разломов, км	Колич. определ. гипоцентров (H_1 и H_2)	Средняя глубина на гипоцентрах H_1 , H_2 , км	Колич. определ. гипоцентров (H_3)	Средняя глубина гипоцентров H_3 , км	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	63	6	27	2	5	14	9
2	47	8	609	5	8	384	13
3	53	10	490	5	9	294	15
4	45	6	23	6	13	15	20
5	68	12	356	7	9	269	12
6	102	6	2	8	8	2	8
7	90	9	159	8	12	117	16
8	76	6	46	9	11	35	14
9	130	9	4	9	12	2	24
10	89	10	15	9	11	11	15
11	41	12	6	10	11	4	16
12	65	10	64	11	13	60	15
13	14	13	21	12	17	15	24
14	26	14	39	12	14	32	18
15	80	9	72	13	15	59	18
16	54	13	50	13	16	43	18
17	86	9	77	14	16	66	19
18	56	13	23	15	17	15	19
19	31	14	44	16	17	20	21
20	42	20	19	19	22	15	27
21	57	10	297	*	7	143	15

* При применении первого методического приема для "квадрата" 21 получено мнимое значение средней глубины гипоцентров, поэтому данный "квадрат" из расчетов исключен.

2443 при определении H_1 и H_2 (H_1 – средние глубины гипоцентров при учете мнимых значений; H_2 – средние глубины гипоцентров с приравниванием мнимых значений нулю). При этом, если в том или ином "квадрате" осреднения мнимые числа преобладали или имели большое абсолютное значение, что приводило к выражению средней глубины гипоцентров мнимым числом, такие "квадраты" из расчетов исключались, как не имеющие физического смысла. При приравнивании мнимых значений нулю общая средняя нижняя граница глубин гипоцентров опускается максимально до 22 км, а колебание составляет 5–22 км, т.е. несколько превосходит колебание средних длин разломов. И, наконец, при применении третьего методического приема, когда мнимые значения гипоцентров вообще не принимаются во внимание, общая средняя нижняя граница залегания очагов опускается до 27 км, а средние колебания их составляют 9–27 км, и намного превосходят колебания длин разрывов.

Какова же физическая сущность каждого из использованных методических приемов? При определении глубины очага для отдельного зафиксированного землетрясения сейсмологами допускается ошибка до ± 10 км (класс б). Величина упомянутой ошибки в большей степени зависит от удаленности гипоцентра от двух ближайших к нему станций. Расстояние эпицентр – станция (Δ) не должно превышать 50 км, т.е. чем оно больше, тем больше вероятность в увеличении ошибки при определении положения гипоцентра. Следовательно, в каждом конкретном случае с равной ошибкой могут быть определены как действительные, так и мнимые значения глубин очага.

При применении первого методического приема мы допускаем, что всякое определение глубины гипоцентра реально, а мнимые значения возникают только из-за ошибки. При определении средней величины они имеют такой же вес, как и любое другое значение.

Применяя вторую методику с приравниванием мнимых значений 0, мы искусственно уменьшаем ошибку в определении гипоцентра, иногда даже больше, чем на -10 км, в тех случаях, когда мнимое значение очага > 10 км. С физической точки зрения мы искусственно, игнорируя ошибку, подтягиваем группу гипоцентров к поверхности Земли. Следовательно, в этом плане

второй методический прием не только не уточняет и не улучшает первого, но и сам имеет довольно существенные недостатки.

Следуя третьему методическому приему, мы вообще не принимаем во внимание мнимых значений глубин гипоцентров, как не имеющих физического смысла. Таким образом, отбрасывая мнимые значения очагов, мы тем самым сводим на нет ошибку в определении и действительных, и мнимых значений глубин гипоцентров меньших 10 км, которые в общем поле статистических данных составляют значительный процент. В связи с этим правомерность подобного допущения становится несколько сомнительной, хотя при этом приеме чисто внешне не искажается физическая сущность явления.

Расчет коэффициента корреляции производился по общепринятым формулам (Шторм, 1970). Коэффициент корреляции для выяснения связи $L - H_1$, $L - H_2$, $L - H_3$ определялся для каждого из перечисленных приемов отдельно.

Наиболее высокий коэффициент корреляции был получен при сопоставлении L и H_1 ($r = 0,73$), когда глубина очага определялась с учетом и действительных, и мнимых значений. Его доверительные границы при пороге вероятности безошибочных прогнозов $\beta_1 = 0,95$ колеблются в пределах $\pm 0,34$. Уравнения регрессии, рассчитанные по известным формулам (Шторм, 1970), имеют вид:

$$H_1 = 1,04L - 0,7 \text{ (км)}; \quad (1)$$

$$L = 0,5 H + 5,35 \text{ (км)}. \quad (2)$$

Доверительные границы линий регрессии определены из формулы:

$$\Delta_{\text{гн}} = \sigma_{\text{гн}} \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}; \quad \Delta = t_{st} \cdot \Delta_{\text{гн}}$$

и равны при первом пороге вероятности безошибочных прогнозов ($\beta_1 = 0,95$) $\pm 1,72$ для уравнения (1) и $\pm 1,22$ для уравнения (2), и при третьем ($\beta_3 = 0,999$) пороге вероятности безошибочных прогнозов соответственно $\pm 3,2$ и $\pm 2,26$ км (рис. 1).

Два других коэффициента корреляции (коррелирование L и H_2 , L и H_3) несколько ниже и имеют следующие значения: $r_2 = 0,67$ и $r_3 = 0,66$. Их доверительные границы при первом (β_1) пороге вероятности безошибочных прогнозов колеблются в пределах $\pm 0,25$ (для r_2 и r_3). Уравнения регрессии имеют вид:

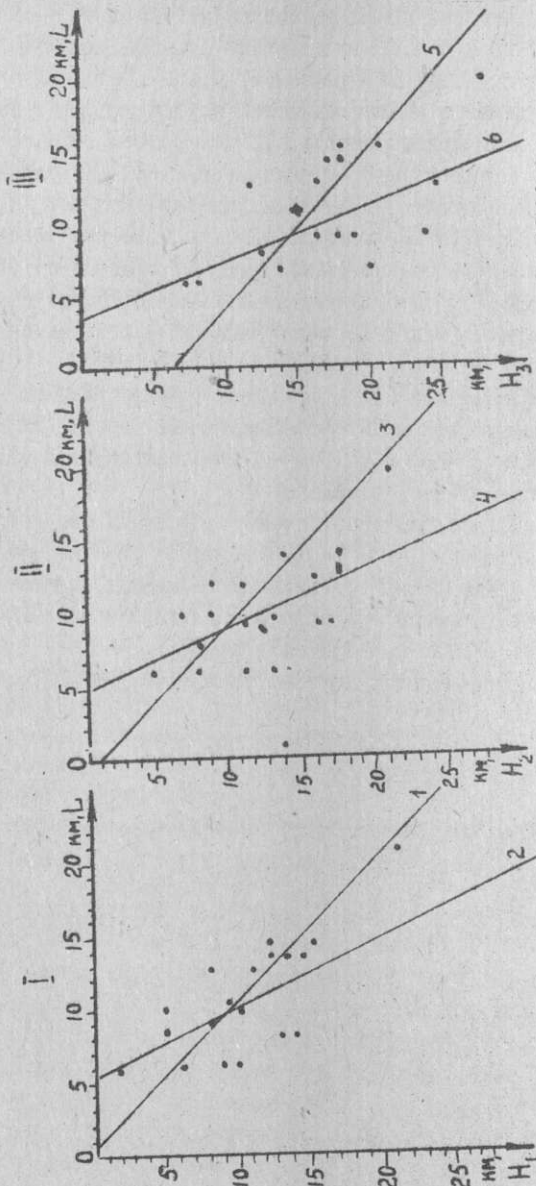


Рис.1. Графики зависимости между длиной разрывов и глубиной гипоцентров:

I - график зависимости между L и H_1 ; II - график зависимости между L и H_2 ; III - график зависимости между L и H_3 ;

1,2,3,4,5,6 - линии регрессии соответствующих уравнений

$$H_2 = 0.94L + 0.7 \text{ (км)} ; \quad (3)$$

$$L_2 = 0.47H + 5.2 \text{ (км)}. \quad (4)$$

Их доверительные границы колеблются в пределах $\pm 1,78 - \pm 3,31$ для уравнения (3) и $\pm 2,34$ км для уравнения (4).

$$H_3 = 0.9L + 6.1 \text{ (км)} ; \quad (5)$$

$$L_3 = 0.4H_3 + 3.8 \text{ (км)}. \quad (6)$$

Доверительные границы уравнений (5) и (6) изменятся от $\pm 1,78$ при β_1 до $\pm 3,34$ км при β_3 для уравнения (5) и от $\pm 1,24$ до $\pm 2,4$ км для уравнения (6).

Все три коэффициента корреляции имеют довольно высокие значения, что, по-видимому, ещё раз подчеркивает существование тесной генетической связи между формированием разрывов и сейсмической активностью, связующим звеном между которыми служит разрядка тектонических напряжений. Наиболее высокий коэффициент корреляции, установленный при статистическом анализе данных по Прибайкалью, получен при использовании первого методического приема.

Исходя из того, что и глубины залегания очагов, а значит и глубины разрывных нарушений, в среднем в этом случае меньше, чем длины разрывов, а первый коэффициент корреляции ($r_1 = 0,73$) несколько больше, чем второй и третий, то вероятно, первый методический прием является наиболее правильным (Шерман, Лобацкая, 1972). В практических задачах имеет смысл лишь одна прямая регрессия (Шторм, 1970), поэтому предпочтительнее пользоваться уравнением (1), поскольку длины разрывов при среднемасштабной съемке определяются достаточно надежно.

Анализируя известные данные о глубинах проникновения разломов, об амплитудах перемещения по ним не трудно установить, что глубина проникновения разрывов в земную кору, как правило, не превышает их протяженности на поверхности земли, а часто и несколько меньше последней. Таким образом, можно констатировать соизмеримость размеров региональных дизъюнктивных структур на поверхности с глубиной их активного проникновения в земную кору.

А р х а н г е л ь с к и й и др. Руководство по производству и обработке наблюдений на сейсмических станциях СССР. Ч.2. М., 1954.

В а щ и л о в Ю. Я. Структура верхней мантии и земной коры Западно-Сибирской низменности. - Изв.АН СССР, сер. физика Земли, 1971, № 1.

Г з о в с к и й М. В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. АН СССР, 1963.

Г з о в с к и й М. В. Развитие новых направлений в тектонофизике. - Изв.АН СССР, сер. физика Земли, 1970, № 5.

Г о л е н е ц к и й С.И. Определение мощности земной коры по наблюдениям волн, отраженных от ее подошвы, и глубины залегания очагов афтершоков Среднебайкальского землетрясения 29 августа 1959 г. - "Геология и геофизика", 1961, № 2.

Г о л е н е ц к и й и др. Общий обзор сейсмичности Прибайкалья в 1967 г. - В кн.: "Землетрясения в СССР в 1967 г." М., "Наука", 1970.

З о р и н Ю. А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. М., "Наука", 1971

К о с т р о в Б.В. Теория очагов тектонических землетрясений. - Изв.АН СССР, сер. физика Земли, 1970, № 4.

К р ы л о в и др. Строение земной коры по профилю ГСЗ через Байкальскую рифтовую зону. - "Геология и геофизика", 1970, № 1.

К у з н е ц о в а К. И. Закономерности разрушения упруго-вязких тел и некоторые возможности приложения их к сейсмологии. М., "Наука", 1969.

П ш е н и к о в К.В. Анализ эпицентрального поля землетрясений Байкальского рифта за 1961-1965 гг. - В сб.: "Землетрясения в СССР в 1968 г." М., "Наука", 1970.

Т р е с к о в А.А. Сейсмичность и строение коры в зоне Байкальского рифта. - В кн.: "Байкальский рифт". М., "Наука", 1968.

Ш е р м а н С.И., Л о б а ц к а я Р.М. О корреляционной зависимости между глубиной гипоцентров и длиной разрывов в Байкальской рифтовой зоне. - ДАН СССР, т.205, 1972, № 3.

Ш т о р м Г. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М., "Мир", 1970.