

С. И. ШЕРМАН

О СООТНОШЕНИИ МЕЖДУ ДЛИНОЙ ОДИНОЧНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ И ИХ ЗИЯНИЕМ

(на примере Байкальской рифтовой зоны)

Верхняя часть земной коры разбита многочисленными трещинами и разломами различного масштаба. Знание количественных параметров разрывов имеет большое практическое значение. Одним из таких параметров является величина зияния. Зияние отдельных трещин, степень их открытия играют существенную роль в скорости протекания ряда экзогенных процессов, определяют устойчивость коренных выходов при промышленном и гражданском строительстве, скорость инфильтрации и фильтрации поверхностных и подземных вод. Умение оценивать истинное зияние трещин на глубине необходимо при оценке запасов месторождений полезных ископаемых жильного типа и в других случаях повседневной геологической практики.

В настоящее время вопрос о степени зияния разрывов в земной коре является дискуссионным. При экспериментальном исследовании поведения горных пород в условиях высоких давлений и температур, соответствующих глубинам 3—5 км, достигается полное закрытие микротрещин и даже пор. На этом основании делается вывод об отсутствии открытых трещин на глубинах свыше 3—5 км. В. В. Белоусов (1966), опираясь на данные Р. Аффена и А. Жессопа (Uffen Jessor, 1963) пришел к заключению, что до глубины в 40 км допустимо образование зияющих трещин. В. В. Белоусов не исключает возможности проникновения открытых трещин и на несколько большие глубины. Действительно, можно привести целую серию фактов, доказывающих существование зияющих разрывов на значительных глубинах. В Прибайкалье, например, известны горячие источники, температура изливающейся под напором воды из которых превышает 80°C (Могойский источник) на выходе. По расчетам С. В. Лысак (1968), такие воды в Байкальской рифтовой зоне формируются на глубине 3—6 км. Отсюда можно заведомо утверждать о наличии зияющих трещин на названных глубинах. По мнению Е. Н. Люстиха (1961), в общем случае, существование открытого разрыва в земной коре может поддерживаться периодическим подъемом по нему масс горячего вещества. Разрыв при этом превращается в канал, заполненный веществом с более низкой, чем окружающие породы, вязкостью.

Во всех случаях почему-то не принимается во внимание ни длина разрыва, ни крепость горных пород, ни некоторые другие факторы, которые не менее существенно влияют на степень зияния разрыва. Автор попытался на примере Байкальской рифтовой зоны выяснить зависимость величины зияния разрывов от их длины и прочности горных пород.

Решение задачи позволило бы в общем случае оценивать среднее зияние разрыва по его длине на земной поверхности.

Разрыв в земной коре после своего возникновения может остаться в виде открытой трещины либо при сохранении неизменным поля

напряжений, вызвавшего его образование, либо при частом изменении этого поля, которое ведет к перемещению вдоль плоскостей разрыва, или, наконец, при выполнении разрыва каким-то веществом, создающим в его полости определенное внутреннее давление. Однако одновременно со всеми названными причинами существование в элементарном понимании открытой трещины на глубине необходимо еще рассматривать с точки зрения физических свойств породы как функцию напряжения внутри полости трещины и крепости горных пород. Последнее особенно важно для молодых разрывов, полость которых продолжительное время остается открытой или заполняется высокоподвижными гидротермальными растворами, собственное внутреннее давление которых на стенки трещин относительно невелико.

Рассмотрим общие условия существования открытой трещины в земной коре. Известно, что естественные трещины в горных породах из-за малого в целом для Земли периода релаксации долго существовать не могут. В то же время, если рассматривать непосредственно земную кору, то из-за большой вязкости коры, приближающейся к порядку 10^{26} пз, в ней могут сохраняться разрывы определенной длины и зияния. При названной величине вязкости и достаточной высокой скорости деформации материал, слагающий земную кору, можно считать упругим. Сохранению в материале упругих свойств способствует и небольшое литостатическое давление горных пород, величина которого в пределах коры не превышает 10—12 кбар. Поскольку трещины в естественных природных условиях имеют чаще всего довольно сложную форму, мы будем рассматривать идеальный случай, когда трещина образована двумя поверхностями с бесконечно большим радиусом кривизны. Третье измерение трещины примем бесконечно малым и, таким образом, будем рассматривать решение задачи в плоскости.

Чисто физически задача сводится к рассмотрению деформации горных пород вокруг одиночной трещины, расположенной в упругой плоскости (Мухелишвили, 1966). Расчет проводится согласно теории хрупкого разрушения с допущением, что тело сохраняет свойство линейной упругости вплоть до разрушения. Может ли эта теория быть применима для горных пород, слагающих земную кору, поскольку последние, хотя и в незначительной степени, обладают пластичностью, особенно в стадии, предшествующую разрушению? Рассматривая теорию хрупкого разрушения, Ирвин (Irwin, 1948), Орован (Ogovan, 1950), Г. И. Баренблатт и др. (1966) показали, что существование пластической области в малых размерах и ее сосредоточение в непосредственной близости к поверхности трещин коренным образом не меняет законов квазихрупкого разрушения. Названные исследования позволяют использовать теорию хрупкого разрушения и при рассмотрении поставленного вопроса.

Ю. П. Желтовым (1966) показано, что если на контур трещины действует в направлении, перпендикулярном простиранию трещины, постоянная нагрузка P , расширяющая трещину, то легко найти величину раскрытия трещины m (рис. 1):

$$m = \frac{2(1 - \nu^2)Pl}{E} \cdot \sqrt{1 - \frac{x}{l^2}}, \quad (1)$$

где P — расширяющая нагрузка, действующая на трещину;

l — половина длины трещины;

E — модуль Юнга;

ν — коэффициент Пуассона.

Максимальное раскрытие трещина будет иметь в точке O при $x=0$:

$$m = \frac{2(1 - \nu^2)Pl}{E}. \quad (2) \quad (\text{Желтов, 1966})$$

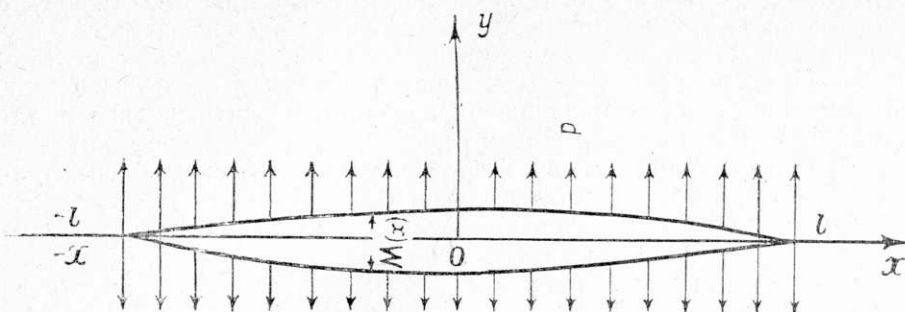


Рис. 1

Схема деформации горных пород с одиночной трещиной
(по Ю. П. Желтову, 1966).

Поскольку w характеризует изменение параметра в положительную сторону роста y , полное максимальное раскрытие трещин M будет равно:

$$M = \frac{4(1 - \nu^2)Pl}{E} \quad (3)$$

В конкретных условиях поставленной задачи надо определить то минимальное значение расширяющей нагрузки P на трещину, при котором она будет оставаться открытой, т. е. иметь определенную, заданную величину зияния:

$$P = \frac{EM}{4l(1 - \nu^2)} \quad (4)$$

Для определения параметров E и ν воспользуемся зависимостью между отношением распространения скорости упругих волн в земной коре и константами упругости горных пород:

$$E = \rho \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}; \quad (5) \text{ (Гутенберг, 1963)}$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \right], \quad (6) \text{ (Гутенберг, 1963)}$$

где ρ — плотность среды;

V_p — скорость распространения продольных волн;

V_s — скорость распространения поперечных волн.

Таким образом, используя приведенные расчеты, рассмотрим оптимальное зияние открытых разрывов в Прибайкалье, принимая во внимание конкретную геологическую обстановку.

Мощность земной коры в Прибайкалье, по данным С. Г. Голенецкого (1961, 1965), определена в пределах ≈ 40 км. По данным этого же исследования, скорость распространения в земной коре Прибайкалья продольных волн колеблется в пределах около 6,1 км/сек; поперечных 3,51 — 3,56 км/сек. Промежуточные границы раздела до этой глубины отбиваются с большим трудом и с малой степенью достоверности. Поэтому для дальнейших расчетов примем однослойную модель строения коры. Все Прибайкалье главным образом сложено гнейсами, гранито-гнейсами, мигматитами и мраморами, т. е. породами преимущественно высокой стадии метаморфизма.

Величина расширяющей нагрузки Р (тыс. атм.) для зияющих разрывов различной протяженности в Прибайкалье

l, м	M=0,01	M=0,1 см	M=1,0	M=2,0 см	M=3,0 см	M=5,0 см	M=10,0 см	M=20,0 см	M=50,0 см
50,0	0,5093	5,093	50,93	101,86	115,28	254,65	509,3	1018,6	2546,5
100,0	0,2546	2,546	25,46	50,92	76,38	127,30	254,6	509,2	1273,0
150,0	0,1698	1,698	16,98	33,96	50,94	84,90	169,8	339,6	849,0
200,0	0,1273	1,273	12,73	25,46	38,19	63,65	127,3	254,6	636,5
300,0	0,0849	0,849	8,49	16,98	25,46	42,44	84,9	169,8	424,4
500,0	0,0509	0,509	5,09	10,19	15,28	25,46	50,9	101,9	254,6
750,0	0,0339	0,339	3,40	6,79	10,18	16,98	34,0	67,9	169,8
1000,0	0,0255	0,225	2,55	5,92	7,64	12,73	25,5	59,2	127,3
5000,0	0,005	0,051	0,51	1,2	1,53	2,55	5,1	10,2	25,5
10000,0	0,003	0,025	0,25	0,50	0,75	1,27	2,5	5,0	12,7
15000,0	0,002	0,017	0,17	0,34	0,51	0,85	1,7	3,4	8,5
20000,0	0,001	0,013	0,13	0,26	0,39	0,65	1,3	2,6	6,5
50000,0	<0,001	0,005	0,05	0,10	0,15	0,25	0,5	1,0	2,5
100000,0	<<0,001	0,002	0,02	0,05	0,08	0,13	0,3	0,5	1,3

Примем среднюю плотность этих пород $\rho = 2,75 \text{ г/см}^3$.

Исходя из равенств 5 и 6, нетрудно определить усредненные упругие константы для земной коры Прибайкалья, допуская изотропное строение слагающего земную кору материала. Несложные расчеты позволяют получить среднее значение модуля Юнга для земной коры Прибайкалья $E = 8,5558 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2$, и коэффициент Пуассона $\nu = 0,2485$.

Известно, что амплитуда зияния трещин в земной коре может колебаться в широких пределах от долей миллиметра до десятков сантиметров. Однако при зиянии, меньшем, или равном 0,01 см, трещины практически становятся закрытыми и даже не всегда легко различимы невооруженным глазом. Примем наименьшую величину зияния открытых разрывов равной 0,01 см и определим для условий Прибайкалья при заданной полудлине разрыва l минимально допустимое значение расширяющей нагрузки P , ниже которой разрывы начинают практически смыкаться. Параллельно найдем для заданных полудлин разрывов значение необходимой расширяющей нагрузки P для сохранения в условиях давлений земных недр трещин с определенным зиянием.

Расчеты проведены по уравнению 4 для значений M , последовательно равных 0,01; 0,1; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 10,0 и 50,0 см при изменении полудлины разрыва от 50 м до 100 км (табл. 1). Как видно из таблицы, величина расширяющей нагрузки колеблется от 1 до 2000 тысяч атмосфер. В земной коре возможны широкие пределы колебаний давлений, но они не безграничны. Р. Аффен и А. Жессоп (Uffen, Jessop, 1963) показали, что возможные максимальные отклонения при сжатии и растяжении не могут превышать 8—10 кбар для глубин до 40 км. Аналогичный порядок величин изменения всестороннего давления на глубинах в 50—60 км приводится и М. В. Гзовским (1963). Сопоставляя эти цифры с приведенными табличными величинами, необходимо исключить из реального обсуждения как раз те данные, где значение расширяющей нагрузки превышает 200000 атмосфер, т. е. сумму литостатического давления горных пород Прибайкалья (табл. 2), и возможное ее максимальное увеличение.

Таблица 2

Величина литостатического давления в земной коре Прибайкалья
($\rho = 2,75 \text{ г/см}^3$)

Глубина, км	Давление, тыс. атм.	Глубина, км	Давление, тыс. атм.	Глубина, км	Давление, тыс. атм.
0,05	0,014	2,0	0,55	20,0	5,50
0,1	0,028	3,0	0,82	25,0	6,88
0,5	0,14	5,0	1,38	30,0	8,25
1,0	0,28	10,0	2,75	35,0	9,62
1,5	0,42	15,0	4,12	40,0	11,00

Анализ и сопоставление величин табл. 1 и 2 суммированы на графике (рис. 2), который построен в логарифмическом масштабе.

Кривая I показывает границы оптимального зияния открытых разрывов, давление внутри которых поддерживается либо связью с магматическим очагом, либо тектоническими силами. Длительное существование таких разрывов как открытых трещин невозможно.

Кривая II ограничивает условия оптимального существования открытых разрывов, для поддержания зияния которых расширяющая нагрузка не превышает 5 тысяч атмосфер. Такое внутреннее давление может создать столб жидкости, например, с плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$ и высотой до 50 км. Учитывая более высокую плотность движущихся в земной коре гидротермальных растворов, можно с большой степенью вероятности говорить о наличии реальных условий для существования в земной коре Прибайкалья, особенно в ее

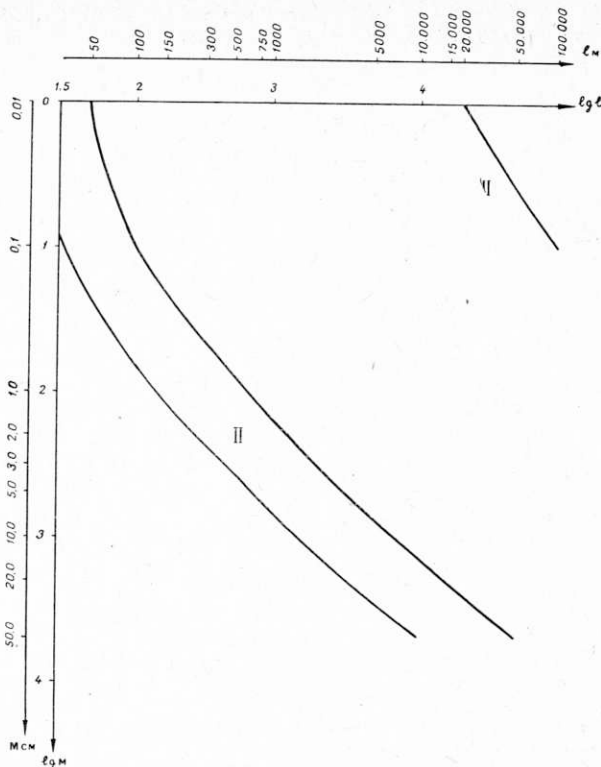


График зависимости полудлин открытых разрывов и их зияния при различном характере заполнения.

I — открытые, не выходящие на поверхность разрывы, связанные с магматическим очагом; II — открытые разрывы, с движущимися гидротермальными растворами или водоносные; III — открытые разрывы.

верхней части, открытых разрывов, по которым происходит постоянное движение растворов. Соотношение между полудлиной таких разрывов и их мощностью видно из графика.

Нарушение по какой-либо причине гидростатического давления жидкости может привести для разрывов одной и той же длины к уменьшению зияния или даже к полному смыканию.

Наконец, кривая III показывает оптимальную величину зияния для «полных» разрывов. Как видно, практически это «волосные» трещины, длина которых должна превышать 20—40 км. Реальное существование таких сплошных трещин трудно представить.

Каждая из кривых графика построена по верхним пределам цифр, соответственно ограниченных на табл. 2 жирными пунктирной, сплошной и двойной линиями.

К примеру, из приведенных расчетов вытекает, что если при землетрясении образуется или раскрывается трещина длиной в 1 км ($l=500$ м), то невзирая на видимое ее зияние на поверхности, можно утверждать, что после снятия напряжений она очень быстро сомкнется на глубине и станет практически закрытой ($M < 0,01$ см). В случае же заполнения ее, например, водой, она также сомкнется, но до величины, не превышающей 0,1 см, и с таким зиянием сохранится при стабилизации поля напряжений продолжительное время.

Таким образом, установленная зависимость между полудлиной разрывов в Прибайкалье и их зиянием дает возможность оценивать реальное значение последнего параметра в объеме разреза земной коры.

Приведенные расчеты базируются на усредненных константах прочности горных пород. Многообразие природных процессов, несомненно, приведет к усложнению условий существования открытых раз-

рывов. Однако полученные зависимости позволяют реально оценивать порядок возможных колебаний затронутых в статье параметров длин трещин и их зияния.

ЛИТЕРАТУРА

Баренблатт Г. И., Каландина А. И., Манджавидзе Г. Ф. Краткий обзор некоторых работ последнего времени. — В кн.: Мусхелишвили Н. И. «Некоторые основные задачи математической теории упругости». М., «Наука», 1966.

Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия материков. М., «Наука», 1966.

Гзовский М. В. Тектонофизика и проблемы происхождения магм различного химического состава. — В сб.: «Проблемы магмы и генезиса изверженных горных пород». М., 1963.

Голенецкий С. И. Определение мощности земной коры по наблюдению волн, отраженных от ее подошвы, и глубины залегания очагов афтершоков Средне-Байкальского землетрясения 29 августа 1959 г. «Геология и геофизика», 1961, № 2.

Голенецкий С. И. Мощность земной коры на среднем Байкале по наблюдениям над обменными отраженными волнами. «Геология и геофизика», 1966, № 5.

Гутенберг Б. Физика земных недр. М., 1963.

Желтов Ю. П. Деформация горных пород. М., «Недра», 1966.

Лысак С. В. Геотермические условия и термальные воды южной части Восточной Сибири. М., «Наука», 1968.

Люстих Е. Н. Гипотеза дифференциации земной оболочки и геотектонические обобщения. «Советская геология», 1961, № 6.

Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., «Наука», 1966.

Irwin G. R. Fracture dynamics. In «Fracturing of Metals». ASM Cleveland, 1948.

Ogovan E. O. Fundamentals of brittle behavior of metals. In «Fatigue and Fracture of Metals». N. Y. Wiley, 1950.

Uffen R. I., Jessop A. U. The stress release hypothesis of magma formation. Bull Volcanol., Napoly, 1963, XXVI B. V.