

М. И. ПОГРЕБИСКИЙ, С. Н. ЧЕРНЫШЕВ

ТРЕЩИНЫ ОПЕРЕНИЯ СЕЙСМОГЕННЫХ СДВИГОВ

(Представлено академиком А. В. Пейве 14 XI 1973)

Сильные землетрясения связаны с мгновенным, в геологическом смысле, возникновением на поверхности Земли разрывов протяженностью в десятки и сотни километров, окаймленных трещинами оперения. Если сами разрывы исследованы (¹, ⁶⁻⁸), то их оперение редко привлекало внимание геологов. Между тем, его изучение, в соответствии с принципом актуализма, может пролить свет на закономерности развития тектонических приразрывных трещин, возникших в горных породах в прошлые эпохи и распространенных, как известно, чрезвычайно широко. Кроме того, исследование трещин оперения сейсмогенных разрывов может быть существенно в связи с задачей определения ширины сейсмоопасной зоны в окрестности сейсмогенного разрыва. Это побудило нас описать геометрию и морфологию сейсмогенных трещин и показать их сходство с тектоническими трещинами по параметрам и динамике образования.

Фактический и иллюстративный материал по трещинам оперения сейсмогенных сдвигов, возникших при землетрясениях, был получен авторами во время полевых работ в Могоде (Монголия). Кроме того, для сравнения были привлечены весьма ограниченные данные по аналогичным сдвигам в Янице в Турции (⁸) и горах Хангай в Монголии (¹), кратко охарактеризованным в табл. 1.

Разрыв в Могоде пересекает различные элементы рельефа и в плане, при сохранении общего направления, имеет извилистую форму, характерную для тектонических разрывов вообще (²). На местности разрыв отмечен зияющими трещинами в дерновом покрове, вывороченными и перевернутыми блоками дернины, буграми типа кротовин. Разрывы в Янице и Хангае морфологически не отличаются от могодского.

В полосе в несколько десятков метров (в Могоде до 300 м) по обе стороны от разрывов наблюдаются трещины оперения, проникающие в четвертичный покров на глубину в десятки и сотни сантиметров. Рыхлые

Таблица 1

Адрес	Дата землетрясения	Интенсивность, баллы	Магнитуда	Длина, км	Амплитуда смещения, м
Могод	5 I 1967	10	7,5	45	2,5
Яница	18 III 1953	10	7,5—8,0	50	4,3
Хангай	9—23 VII 1905	11	—	450	—

образования разбиты трещинами на полигоны или надорваны в отдельных местах (рис. 1). Трещины параллельны основному сместителю или направлены под острым углом к нему. Для могодского разрыва характерны две системы оперяющих трещин, образующих острый угол, по различным измерениям меняющийся от 52 до 62°. Вдоль биссектрисы этого угла проходят основной разрыв и параллельные ему опережающие трещины. Это хорошо видно на рис. 2, построенном по измерениям в Могоде (измерена ориентировка более чем 300 трещин) и материалам (⁸). Начало отсчета на

розе трещин совмещено с направлением разрыва и расположено слева на горизонтальной линии. По часовой стрелке отложены углы между трещинами и направлением разрыва. Плотность трещин показана в соответствии с масштабом на горизонтальной прямой. На диаграмме видна слабо выраженная система опережающих трещин, следующая вдоль линии разрыва (углы 0–15°), а также две системы косых трещин, образующих с линией разрыва углы 40 и 135°. С точностью до 5° разрыв проходит по биссектрисе угла между системами, равного в данном случае 85°. Кроме того, имеются две системы трещин (углы 75 и 105°), также симметричные относительно основного разрыва и отклоняющиеся от него на 75°. На круговых

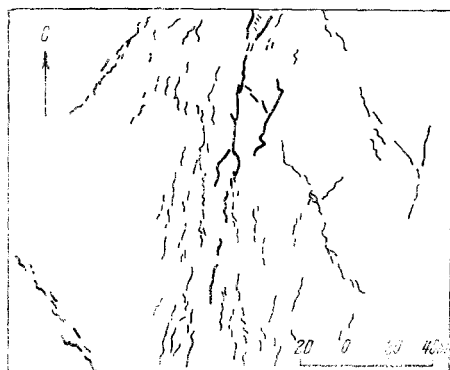


Рис. 1. Оперяющие трещины на поверхности Земли к югу от Могода. Масштаб 1:15

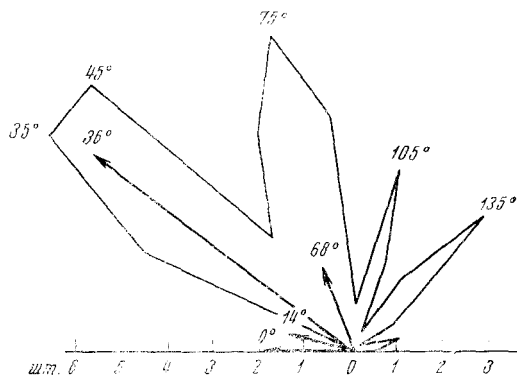


Рис. 2. Роза-диаграмма оперяющих трещин в четвертичных отложениях у разрыва, возникшего при землетрясении в Янице и в Могоде (стрелки)

диаграммах трещины оперения сейсмогенных разрывов образуют характерные для сдвигов пояса, проходящие по внешней окружности диаграмм. Таким образом, по ориентировке они близки тектоническим трещинам оперения сдвигов.

Измерения других параметров трещин оперения были выполнены авторами для могодского разрыва на местности и фотоснимках. Как видно из табл. 2, частные значения параметров оперяющих трещин имеют большие стандартные отклонения. Практически ширина трещин меняется от 0,4 до 1,0 м, расстояния между ними (густота) от 2,2 до 18,2 м, длина от 3 до 76 м. Оценка вида распределения параметров по критерию Пирсона показала, что гипотеза о нормальном распределении для всех параметров отвергается. Гипотеза о логнормальном распределении не отвергается на достаточном уровне значимости (более 0,05) для всех оцениваемых параметров. Такой же результат получен при графической проверке аналогичных гипотез для ширины и густоты по материалам (1). Если обратиться

Таблица 2

Параметры трещин	Объем выборки	Соответствие нормальному закону распределения				Соответствие логнормальному закону распределения			
		ср. значение	станд. отклон.	χ^2	$\chi^2_{0,05}$	ср. значение	станд. отклон.	χ^2	$\chi^2_{0,05}$
Ширина, см	239	25,2	16,3	86,3	9,5	1,31	0,32	8,4	11,1
Длина, м	297	19,4	12,5	24,1	14,1	1,15	0,34	7,9	14,1
Расстояние между трещинами, м	192	6,9	3,6	14,0	7,8	0,79	0,24	2,4	7,8

к тектоническим трещинам, которые представляют собой один из наиболее распространенных и изученных типов трещин в горных породах вообще, то можно заметить, что для вышеупомянутых параметров этих трещин также характерен логарифмически нормальный закон распределения^(3, 4). Таким образом, сравнение тектонических и сейсмогенных трещин показывает, что они близки по виду распределения таких параметров, как ширина, густота и длина трещин. Сходство подчеркивается тем, что для распределения ширины литогенетических трещин, не подвергшихся вторичным изменениям, эмпирический материал согласуется с нормальным законом.

Попытаемся теперь по описанной картине трещиноватости приразрывной зоны восстановить поле напряжений, действовавших в момент образования оперяющих трещин. Для этого воспользуемся теорией прочности Мора⁽⁵⁾, которая хорошо описывает разрушение однородного изотропного материала в условиях быстрого нагружения. Прочность породы, согласно Мору, характеризуется огибающей главных наибольших кругов напряжений. Инженерно-геологическая практика показывает, что для суглинков применима прямолинейная наклонная огибающая. Уравнение ее, выражающее условие разрушения породы, записывается в виде известного закона Кулона

$$|\tau_{nt}| = \sigma_n \operatorname{tg} \rho + K, \quad (1)$$

где τ_{nt} — предельное, для данного материала, касательное напряжение на площадке, по которой происходит сдвиг; σ_n — нормальное напряжение в направлении, перпендикулярном площадке; ρ — угол внутреннего трения материала; K — сцепление материала. Для суглинков рассматриваемого типа ρ и K , определенные при инженерно-геологических изысканиях в соседнем районе, равны соответственно 22° и $0,25$.

Напряжения в крыльях разрыва менялись в процессе роста разрыва и трещин оперения. В начальный момент, до образования основного разрыва, векторы главных нормальных напряжений имели одно направление, в следующий, за вспарыванием поверхности основной трещиной, момент — после разрядки напряжений — другое. Следы этих полей остались в виде трещин. Проведем их реконструкцию.

Основная трещина, по описанию, представляет собой сдвиг. Из теории Мора направление сдвига должно совпадать с направлением максимального тангенциального напряжения. Из той же теории следует ожидать существования второй системы трещин скалывания, расположенной под углом $\pi/2 - \rho$ к первой системе, параллельной основному сдвигу. В Могоде такая система расположена под углом 68° , который в точности совпадает с вычисленным при данном ρ (рис. 2). Это служит убедительным «экспериментальным» подтверждением предложенной гипотезы. Расшифровывая ее, можно записать, что главное максимальное нормальное напряжение σ_1 направлено по биссектрисе угла между названными системами по азимуту 34° (азимут простирания разрыва $\sim 0^\circ$). Среднее по величине главное нормальное напряжение σ_2 направлено по линии пересечения двух систем трещин скалывания. Минимальное σ_3 — в горизонтальной плоскости — перпендикулярно σ_1 , т. е. по азимуту 124° . Это расположение векторов напряжений исчезает в непосредственной окрестности разрыва сразу за раскрытием трещины. Оно продолжает действовать вне зоны разгрузки на концах разрыва и в удалении от него. Под его влиянием по всему разрыву продолжает развиваться сдвиг. За счет трения крыльев в зоне разгрузки возникает новое поле напряжений. Зная направление относительного перемещения крыльев разрыва, зафиксированное смещением маркирующих линий рельефа, нетрудно перейти к полю напряжений, возникающему в однородной среде за счет трения крыльев. Очевидно, максимальное главное нормальное напряжение совпадает с направлением сдвига. Среднее по величине нормальное напряжение будем считать, по-прежнему, вер-

тикальным, минимальное σ_3 — горизонтальным. При работе такой модели сплошность материала будет сохраняться до тех пор, пока на некоторой площадке не выполнится условие (1). Как только условие выполнится, образуется два семейства поверхностей скольжения (две системы трещин — в геологических терминах), образующие угол $\pi/2 - \rho$, в нашем случае 68° . Биссектрисой угла будет направление σ_1 . В оперении могодского разрыва есть система трещин, образующая с направлением сдвига угол 36° . Расчетное значение этого угла из предложенной гипотезы составит 34° , т. е. гипотеза подтверждается. В оперении сдвига в Янице есть аналогичные могодским системы трещин, образующие углы 0 ; 75 и 40° . Замечательно, что оперение в Янице имеет еще две второстепенные системы трещин, которые образуют с направлением сдвига углы 105 и 135° . Можно предположить, что они возникли при повторном толчке, когда направление главного нормального напряжения сменилось на 90° . При этом, в силу постоянства ρ , углы между второстепенными системами оказались те же, что и между первыми.

Таким образом, оперение сейсмогенных сдвигов включает несколько систем вертикальных трещин, которые образуют с плоскостью сместителя углы 0° , $\pi/2 - \rho$, $\pi/4 - \rho/2$, $180^\circ - (\pi/2 - \rho)$ и $180^\circ - (\pi/4 - \rho/2)$. Положение этих трещин в пространстве контролируется положением плоскости сместителя.

В целом приведенный материал свидетельствует о присутствии закономерностей в строении оперения сейсмогенных сдвигов и о совпадении их с таковыми для сети тектонических трещин. Динамическая модель образования трещин не противоречит физической теории образования тектонических разрывов (2).

Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве
Москва

Поступило
13 XI 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Б. Вознесенский, Материалы отделения физической географии, в. 1, Географическое общество СССР, М., 1962. ² М. В. Гзовский, В сборн. Проблемы тектонофизики, М., 1960. ³ М. И. Погребиский, М. В. Рац, С. Н. Чернышев, Бюлл. МОИП, отд. геол., № 3 (1970). ⁴ М. В. Рац, С. Н. Чернышев, Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород, М., 1970. ⁵ К. В. Руппенейт, Механические свойства горных пород, М., 1956. ⁶ Сейсмическое районирование Улан-Батора, «Наука», 1971. ⁷ В. П. Солоненко, Природа, № 9 (1970). ⁸ J. Ketin, F. Roesti, Eclogae geol. Helv., Basel, V. 46. 2 (1953).