

Е. В. ВИЛЬКОВИЧ, Ш. А. ГУБЕРМАН, В. И. КЕЙЛИС-БОРОК

**ВОЛНЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ
НА КРУПНЫХ РАЗЛОМАХ**

(Представлено академиком М. А. Садовским 7 II 1974)

1. Здесь исследуется специфическая пространственно-временная взаимосвязь между сильными землетрясениями на крупных сейсмоактивных разломах. Характер этой взаимосвязи ясен из представления землетрясений точками на плоскости x, t , где x — координата проекции эпицентра на ось разлома (км), t — момент землетрясения (годы). Пример такого представ-

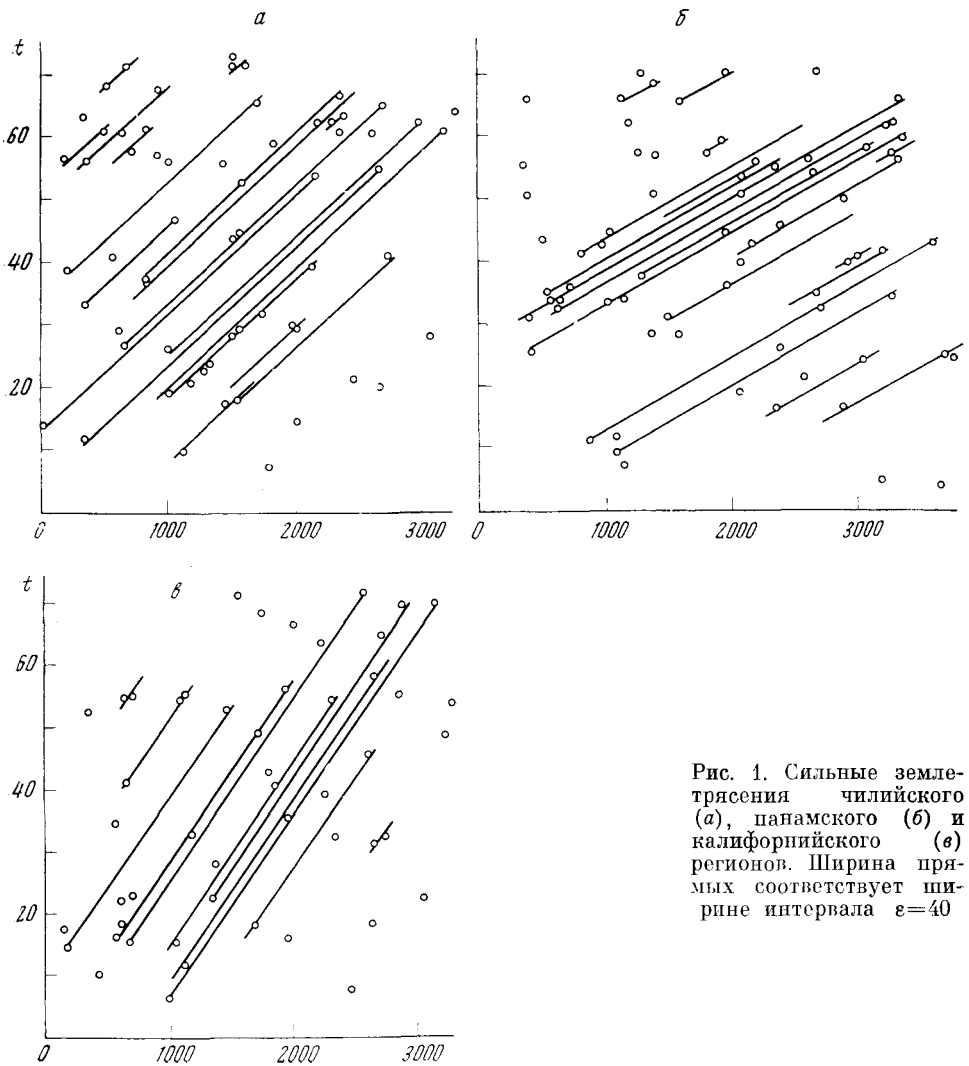


Рис. 1. Сильные землетрясения чилийского (а), панамского (б) и калифорнийского (в) регионов. Ширина прямых соответствует ширине интервала $\varepsilon = 40$

ления дан на рис. 1. Рассматриваемая взаимосвязь выражается в том, что землетрясения ложатся на систему параллельных прямых, как если бы вдоль разлома распространялась с постоянной скоростью серия возмущений, инициирующих землетрясения в некоторых местах.

Каждая прямая соответствует одному возмущению, наклон прямых определяет его скорость. Явление такого рода было отмечено в (1, 2). Здесь мы исследуем статистическую значимость и некоторые характерные особенности этого явления.

2. Был применен формальный алгоритм выделения указанных выше возмущений. Строится функция $\Sigma(\theta, \epsilon)$, характеризующая степень согласованности набора событий

$\{x_i, t_i\}$ с системой параллельных прямых, наклоненных к оси x под углом θ . $\Sigma(\theta, \epsilon)$ выбрана в виде

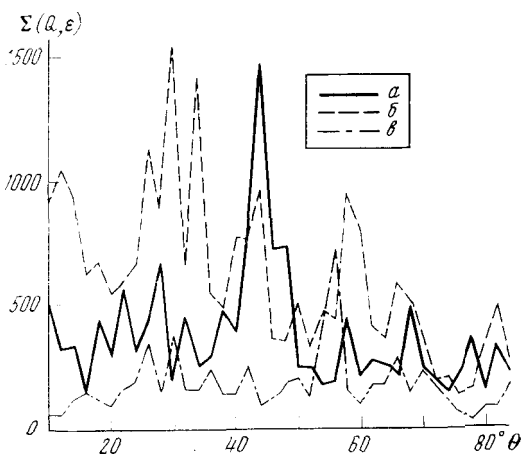
$$\Sigma(\theta, \epsilon) = \sum_{k=1}^l (m_k - 1)^n, \quad (1)$$

где n — целое число, l — количество прямых, m_k — количество событий, лежащих на одной прямой; $m_k l$ зависят от θ . При заданном θ прямые выделяются так. Вычисляем координаты Z_i — проекции $\{x_i, t_i\}$ на перпендикуляр к рассматриваемой системе прямых:

$$Z_i = c_1 t_i \cos \theta + c_2 x_i \sin \theta, \quad (2)$$

где c_1, c_2 — заданные константы.

Рис. 2. Значения функции $\Sigma(\theta, \epsilon)$ для трех регионов: a — чилийский, b — панамский, c — калифорнийский



Упорядочим Z_i по возрастанию. Определим Δ_i — число событий, лежащих в интервале $(Z_i, Z_i + \epsilon)$ для всех i . Отбираем интервал с максимальным значением Δ_i (если максимум достигается при нескольких i , берем наименьшее i), обозначим это Δ_i через m_i . События, попавшие в отобранный интервал, лежат в полосе шириной ϵ ; будем считать их принадлежащими одной прямой. Исключим эти события из рассмотрения, снова определим все Δ_i и аналогично предыдущему находим максимальное Δ_i . Эта процедура повторяется до тех пор, пока все Δ_i не будут равны единице. Затем вычисляем $\Sigma(\theta, \epsilon)$ для данного θ . Ищем $\bar{\Sigma}, \bar{\theta}$, где $\bar{\Sigma} = \Sigma(\bar{\theta}, \epsilon) = \max_{\theta} \Sigma(\theta, \epsilon)$.

Если этот максимум статистически значим, он указывает на существование возмущения, распространяющегося со скоростью $v = -c_2/c_1 \operatorname{ctg} \bar{\theta}$. Из рассмотрения исключались значения θ , близкие к 90° и к 0 ; в первом случае Σ отражает лишь неравномерную плотность эпицентров в пространстве, во втором — рои землетрясений.

3. Значимость рассматриваемых прямых проверялась путем сравнения $\bar{\Sigma}(\bar{\theta}, \epsilon)$ для каталога реальных землетрясений и для псевдослучайных точек $(\tilde{x}_i, \tilde{t}_i)$, вероятностное распределение которых приближенно соответствовало реальному каталогу. \tilde{t}_i считалось равномерно распределенным на интервале, к которому относятся реальные наблюдения; за распределение \tilde{x}_i принималась сглаженная гистограмма наблюдавшихся значений.

Статистический тест проводился следующим образом. Находилась K выборок из N пар псевдослучайных чисел $(\tilde{x}_i, \tilde{t}_i)$, где N — число землетрясений в реальном каталоге. Для каждой выборки по описанному в (2) алгоритму находились значения $\Sigma_j, \bar{\theta}_j, j=1, 2, \dots, K$. На плоскости $(\bar{\theta}, \bar{\Sigma})$

определялся контур, внутрь которого попадает $[pN]$ всех точек $(\bar{\theta}_j, \bar{\Sigma}_j)$. Для определения контура строим поверхность $\bar{K}(\bar{\theta}, \bar{\Sigma})$, где \bar{K} есть число точек $(\bar{\theta}_j, \bar{\Sigma}_j)$, в некоторой окрестности $(\bar{\theta}, \bar{\Sigma})$. Рассматриваемый контур есть пересечение этой поверхности с плоскостью $\bar{K}=c(p)$. Значение p , при котором найденное для реального каталога $(\bar{\theta}, \bar{\Sigma})$ лежит на таком контуре, есть наша оценка статистической значимости рассматриваемого эффекта.

4. Рассматривались нормальные землетрясения с магнитудой $\geq 6,5$ для трех регионов: чилийского (западное побережье Чили), панамского (Центральная Америка) и калифорнийского (разлом Сан-Андреас). Границы принятых регионов и линии, на которые проектировались эпицентры (наша аппроксимация сейсмоактивных разломов), указаны в табл. 1.

Таблица 1

Скорости распространения волн тектонических деформаций и статистические значимости наблюдаемых явлений для различных регионов при $n = 4$, $c_1 = 1$, $c_2 = -50$, $K = 500$, $\varepsilon = 40$

Регионы	Координаты границы региона		Координаты линии проектирования		N	v , км/год	$\bar{\Sigma}(\bar{\theta}, \varepsilon)$	p
	φ	λ	φ	λ				
Чилийский	16°	85°						
	16	55	17°	70°				
	55	55	55	74	63	53	1450	0,9220
Панамский	55	85						
	10	115						
	20	90						
	15	90	21	110	74	86	1534	0,9340
	15	75	5	75				
Калифорнийский	5	75						
	5	90						
	10	90						
	45	135						
	50	125	47	127,5	50	24	695	0,990
	19	98	18	104				
	19	110						

Данные о землетрясениях относятся к периоду 1900–1970 гг. (³⁻⁸). Из рассмотрения исключены явные афтершоки и несколько эпицентров, лежащих далеко от основного облака эпицентров вдоль разлома.

На рис. 1 показаны найденные прямые, на рис. 2 — значения функций $\Sigma(\bar{\theta}, 40)$ для реальных каталогов. Как видно из табл. 1, статистическая значимость найденных максимумов $\bar{\Sigma}(\bar{\theta}, \varepsilon)$ удовлетворительна. Значение $\bar{\theta}$ и статистическая значимость результата устойчивы к выбору афтершоков и к небольшим вариациям линий проектирования. Оговоримся, что статистическая значимость доказана только за счет тех прямых, на которые попадает 5–9 землетрясений. Остается еще невыясненным, какая доля всех землетрясений не случайно попадает на рассмотренную систему прямых.

5. В целом можно считать установленным, что в рассмотренных регионах вдоль главных разломов распространяются с севера на юг возмущения, связанные с возникновением сильных землетрясений. Эти возмущения естественно назвать волнами тектонической деформации, поскольку через сильные землетрясения осуществляется значительная часть тектонических движений по крупным разломам. Остается открытым вопрос, действительно ли эти волны распространяются вдоль разломов или мы

наблюдаем пересечение разломов с волнами, идущими в каком-нибудь другом направлении. Еще неясно также, как объяснить наблюдаемую кажущуюся скорость этих волн — десятки километров в год.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Москва

Поступило
31 I 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ *K. Mogi*, Bull. Earthquake Res. Inst., v. 46, 53 (1968). ² *M. D. Wood, S. S. Allen*, Nature, v. 244, 5413 (1973). ³ *B. Gutenberg, C. F. Richter*, Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, New Jersey, 1954. ⁴ *J. P. Rothe*, The Seismicity of the Earth, 1953–1965, Paris, 1969. ⁵ Землетрясения в СССР в 1966 году, «Наука», 1970. ⁶ Землетрясения в СССР в 1967 году, «Наука», 1970. ⁷ Землетрясения в СССР в 1968 году, «Наука», 1972. ⁸ Землетрясения в СССР в 1969 году, «Наука», 1973.