

УДК 531:550.3

МЕТОД НАДЕЖНОГО КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ КОЛЛИЗИИ

В.М. Ившин¹, Е.В. Ившина²

¹Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail:

²Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119992, e-mail:

1. Введение

Для наблюдения за изменением во времени напряженного состояния земных недр в Петропавловске-Камчатском были созданы геомеханические датчики. Датчики представля-

ют собой вертикальные гильзы, в которых на глубине около пятидесяти метров закреплены двухосные скважинные наклонометры модели НИВ-1 [1]. С помощью датчиков измеряются углы между продольной осью гильзы и отвесной линией в двух взаимно ортогональных плоскостях. Один из датчиков был установлен в рыхлых отложениях. В июне-августе 1993 года этим датчиком в плоскости меридиана и в плоскости первого вертикала были записаны сигналы, приведенные на рис. 1. В предлагаемой статье проводится анализ полученных сигналов. На основании анализа делается вывод, что непрерывные наблюдения с помощью геомеханических датчиков позволят в зонах коллизии делать надежный краткосрочный прогноз сильных землетрясений.

2. Сигналы геомеханического датчика - свидетельство возникновения напряженного состояния чистого сдвига

Рассмотрим вертикальные градиенты горизонтальных смещений, создаваемые в рыхлых отложениях поверхностного слоя земной коры силой тяжести и быстро меняющимися тектоническими напряжениями, которые могут быть обнаружены геомеханическим датчиком.

В декартовой системе координат с горизонтальными осями x , y и вертикальной осью z напряженное состояние поверхностного слоя земной коры в поле силы тяжести можно представить в виде суммы всестороннего равномерного давления

$$-p = s_{zz} \quad (1)$$

под действием которого поверхностный слой находится в стационарном состоянии, и горизонтальных напряжений растяжения

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -(1 - \xi)s_{zz}, \quad (2)$$

где ξ - коэффициент бокового давления, s_{zz} - вертикальное напряжение сжатия [7].

Напряжения растяжения σ_{xx} и σ_{yy} , как показывает анализ движения поверхностного слоя земной коры при учете релаксации напряжения растяжения и зависимости коэффициента вязкости при растяжении λ от глубины [2], создают в рыхлых отложениях вертикальные градиенты горизонтальных смещений γ_{xz} и γ_{yz} , которые определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \gamma_{xz} &\approx -\frac{l_x}{\lambda_x^2} \frac{\partial \bar{\lambda}_x}{\partial z} \bar{\sigma}_{xx} t, \\ \gamma_{yz} &\approx -\frac{l_y}{\lambda_y^2} \frac{\partial \bar{\lambda}_y}{\partial z} \bar{\sigma}_{yy} t, \end{aligned} \quad (3)$$

где l_x и l_y - расстояния вдоль осей x и y от точек, где деформация под действием напряжений σ_{xx} и σ_{yy} в направлении соответствующих осей равна нулю, до точки наблюдения;

$\bar{\sigma}_{xx}, \bar{\sigma}_{yy}, \bar{\lambda}_x, \bar{\lambda}_y$ - средние значения напряжений растяжения σ_{xx}, σ_{yy} и коэффициента вязкости λ на отрезках соответственно l_x и l_y , t - время.

Тектонические напряжения около земной поверхности практически не зависят от глубины. Если учесть при этом, что модуль упругости рыхлых отложений является функцией глубины, а коэффициент Пуассона в случае малых деформаций близок к нулю [3], то на основании закона Гука [6] получим следующее.

Быстро меняющиеся тектонические напряжения сжатия создают в рыхлых отложениях вертикальные градиенты горизонтальных смещений γ_{xz}^P и γ_{yz}^P (верхний индекс «P» от слова pressure), которые имеют вид:

$$\begin{aligned}\gamma_{xz}^P &= \frac{\partial u_x^P}{\partial z} \approx -\frac{l_x^P}{(\bar{E}_x^P)^2} \frac{\partial \bar{E}_x^P}{\partial z} \bar{\sigma}_{xx}^P, \\ \gamma_{yz}^P &= \frac{\partial u_y^P}{\partial z} \approx -\frac{l_y^P}{(\bar{E}_y^P)^2} \frac{\partial \bar{E}_y^P}{\partial z} \bar{\sigma}_{yy}^P,\end{aligned}\quad (4)$$

где l_x^P и l_y^P - расстояния вдоль осей x и y от точек, где деформация под действием напряжений сжатия σ_{xx}^P и σ_{yy}^P в направлении соответствующих осей равна нулю, до точки наблюдения; $\bar{\sigma}_{xx}^P, \bar{\sigma}_{yy}^P, \bar{E}_x^P, \bar{E}_y^P$ - средние значения напряжений сжатия σ_{xx}^P и σ_{yy}^P и модуля упругости E^P на отрезках соответственно l_x^P и l_y^P .

Быстро меняющиеся тектонические напряжения растяжения создают в рыхлых отложениях вертикальные градиенты горизонтальных смещений γ_{xz}^T и γ_{yz}^T (верхний индекс «T» от слова tension), которые описываются соотношениями:

$$\begin{aligned}\gamma_{xz}^T &= \frac{\partial u_x^T}{\partial z} \approx -\frac{l_x^T}{(\bar{E}_x^T)^2} \frac{\partial \bar{E}_x^T}{\partial z} \bar{\sigma}_{xx}^T, \\ \gamma_{yz}^T &= \frac{\partial u_y^T}{\partial z} \approx -\frac{l_y^T}{(\bar{E}_y^T)^2} \frac{\partial \bar{E}_y^T}{\partial z} \bar{\sigma}_{yy}^T,\end{aligned}\quad (5)$$

где l_x^T и l_y^T - расстояние вдоль осей x и y от точек, где деформация под действием напряжений $\sigma_{xx}^T, \sigma_{yy}^T$ в направлении соответствующих осей равна нулю, до точки наблюдения; $\bar{\sigma}_{xx}^T, \bar{\sigma}_{yy}^T, \bar{E}_x^T, \bar{E}_y^T$ - средние значения напряжений растяжения $\sigma_{xx}^T, \sigma_{yy}^T$ и модуля упругости E^T на отрезках соответственно l_x^T и l_y^T .

Из соотношений (3), (4) и (5) видно, что в поле силы тяжести при постоянных тектонических напряжениях вертикальные градиенты горизонтальных смещений в рыхлых отложениях являются линейными функциями времени. При изменении тектонических напряже-

ний линейный ход этих функций нарушается. Рост напряжения растяжения вызовет изменение градиентов смещения в направлении линейного хода, а рост напряжения сжатия - изменение градиентов смещения в направлении, противоположном линейному ходу. Следовательно, временные ряды геомеханического датчика, приведенные на рис. 1, свидетельствуют о нелинейном изменении в июне-августе 1993 года в меридиональном направлении напряжения сжатия, а в широтном - напряжения растяжения. Так как характер и величина этих изменений в обоих направлениях практически одинаковы, можно утверждать, что в указанное время в районе Петропавловска-Камчатского имел место чистый сдвиг вдоль Курило-Камчатской островной дуги.

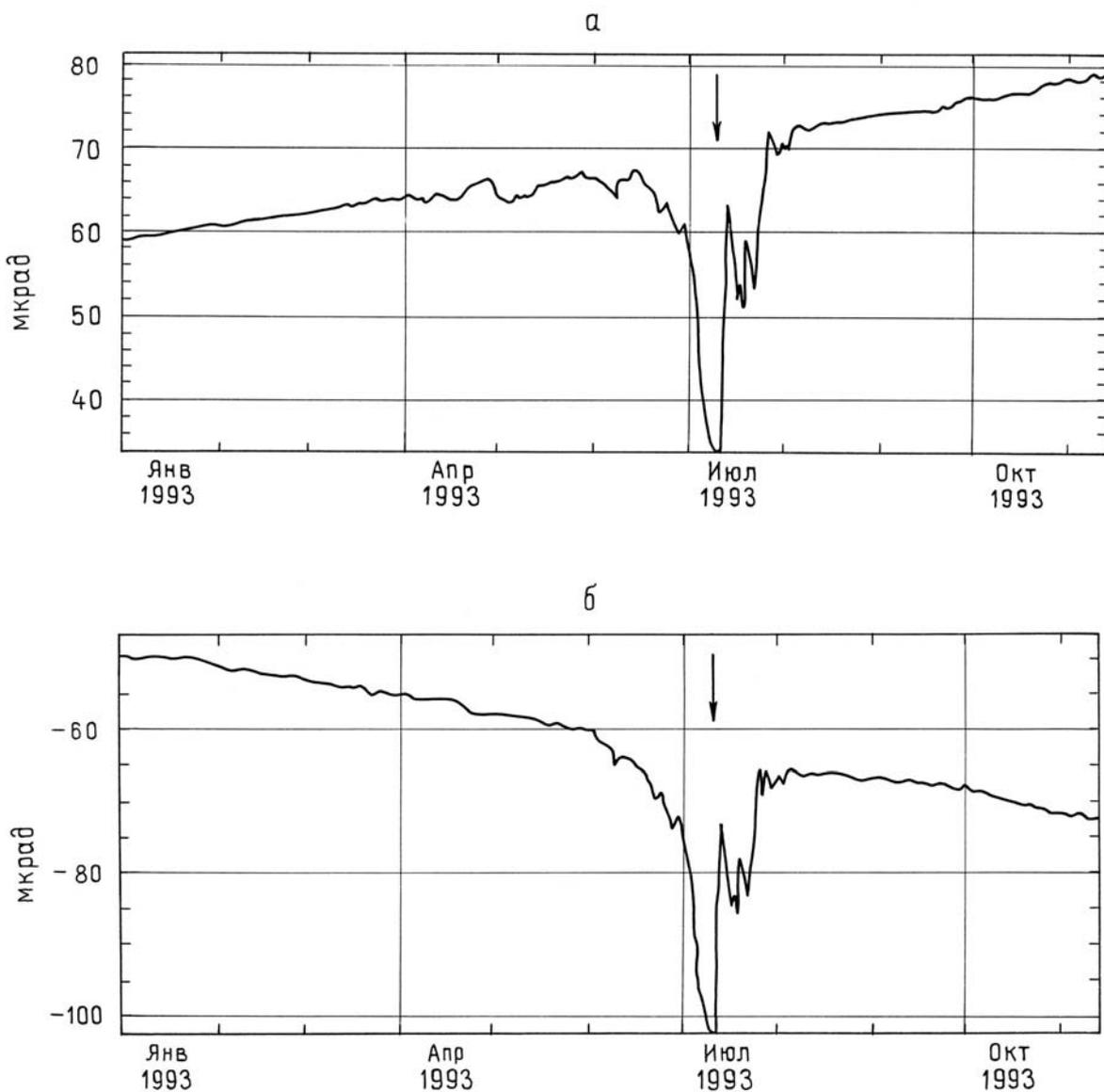


Рис. 1. Временные ряды геомеханического датчика в плоскости меридиана (а) и в плоскости первого вертикала (б). Вертикальная ось временных рядов - ось вертикальных градиентов горизонтальных смещений. Стрелкой указан момент Хоккайдского землетрясения с $M = 7.9$ 12 июля 1993 года.

3. Причина возникновения напряженного состояния чистого сдвига

12 июля 1993 года на юго-западе острова Хоккайдо произошло землетрясение взбросового типа с $M = 7.9$, эпицентр которого имел координаты: $\varphi = 42.79^\circ\text{N}$, $\lambda = 139.21^\circ\text{E}$. Афтершоки землетрясения очертили плоскость разрыва, падающую под углом 10° в восточном направлении. Длина ее в направлении С-Ю равнялась 150 км, в направлении З-В - 50 км. Вспарывание земной коры распространялось с севера на юг [8]. Из сказанного следует, что землетрясение 12 июля 1993 года было вызвано горизонтальной силой сжатия P , возникшей в зоне столкновения Евразийской плиты с Североамериканской в районе фронтальной части Курило-Камчатской островной дуги, ограниченной вулканическим поясом.

Многие данные говорят о том, что жесткость фронтальной части островной дуги больше жесткости вулканического пояса [5]. На основании этого фронтальную часть Курило-Камчатской островной дуги можно представить в виде изогнутой балки треугольного поперечного сечения, у которой конец А, расположенный на Камчатке, заделан, а конец В, расположенный западнее острова Хоккайдо, нагружен силой P (рис. 2).

Рассмотрим, к чему приводит действие силы P [4]. Выделим в точке С бесконечно малый элемент балки ds . Примем следующее правило знаков: силу P и продольную силу N будем считать положительными, если они вызывают растяжение; поперечную силу Q будем считать положительной, если она вращает элемент балки по часовой стрелке; изгибающий момент M будем считать положительным, если он увеличивает кривизну балки. На рис. 2 N, Q и M положительны, P отрицательна.

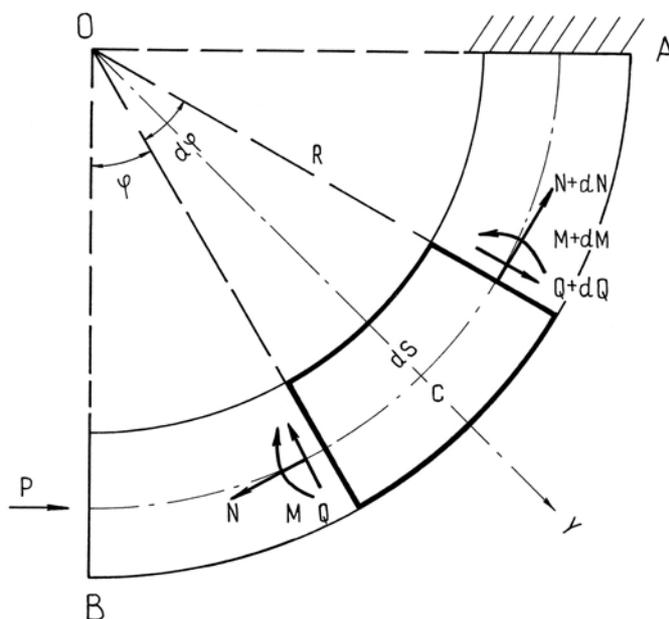


Рис. 2. Схема фронтальной части Курило-Камчатской островной дуги, ограниченной вулканическим поясом, и действующих на нее сил перед Хоккайдским землетрясением с $M = 7.9$ 12 июля 1993 года.

Составим уравнения равновесия бесконечно малого элемента балки в точке С в форме:

$$\sum_i m_i = 0 \quad (6)$$

$$\sum_i f_i = 0 \quad (7)$$

где m_i - момент силы, f_i - проекция силы на ось ОУ.

Уравнение (6) имеет вид:

$$\sum_i m_i = QR \operatorname{tg} \frac{d\varphi}{2} + (Q+dQ)R \cdot \operatorname{tg} \frac{d\varphi}{2} + M - (M+dM) = 0 \quad (8)$$

В (8) вследствие малости угла $d\varphi = \frac{dS}{R}$ можно принять $\operatorname{tg} \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$ и отбросить слагаемое

$RdQ \frac{d\varphi}{2}$ как величину второго порядка малости. В результате получим:

$$- \frac{dM}{d\varphi} + QR = 0 \quad (9)$$

Уравнение (7) записывается:

$$\sum_i f_i = -Q \cos \frac{d\varphi}{2} + (Q+dQ) \cos \frac{d\varphi}{2} - N \sin \frac{d\varphi}{2} - (N+dN) \sin \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad (10)$$

Положим в (10) $\cos \frac{d\varphi}{2} \approx 1$, $\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$ и отбросим слагаемое $dN \frac{d\varphi}{2}$ как величину второго порядка малости. В итоге будем иметь:

$$\frac{dQ}{d\varphi} - N = 0 \quad (11)$$

Из рис. 2 видно, что $N = P \cos \varphi$. Подставив данное значение N в уравнение (11) и решив это уравнение, получим:

$$Q = P \sin \varphi \quad (12)$$

Подставим теперь найденное значение Q в уравнение (9). После решения уравнения найдем:

$$M = -PR \cos \varphi \quad (13)$$

Из соотношений, характеризующих зависимость N, Q и M от P , следует, что в результате действия отрицательной силы P на фронтальную часть Курило-Камчатской островной дуги в последней возникают: отрицательная продольная сила N , отрицательная поперечная сила Q и положительный изгибающий момент M . При этом на Камчатке нормальная сила и изгибающий момент близки к нулю, а поперечная сила практически равна силе P . Поперечная сила вращает элементы Курило-Камчатской островной дуги против часовой стрелки, создавая напряженное состояние чистого сдвига с главными напряжениями примерно меридионального и широтного направления. Возникновение такого напряженного состояния и

было зафиксировано геомеханическим датчиком в районе Петропавловска-Камчатского в июне-августе 1993 года.

4. Вывод

Землетрясение, как известно, является следствием разрыва земных недр, которое возникает тогда, когда напряжение в окрестности будущего разрыва достигает предельного значения. Поэтому непрерывное наблюдение за ростом напряжения в глубинах Земли делает возможным надежный прогноз землетрясения.

Рассмотренные в статье сигналы геомеханического датчика характеризуют рост напряжения в зоне столкновения Евразийской плиты с Североамериканской перед сильным землетрясением. Речь идет о той части сигналов, которая на рис. 1 расположена перед стрелками, указывающими момент землетрясения.

Полученные сигналы свидетельствуют о незначительных пластических деформациях в зонах коллизии перед землетрясением, то есть о существенно хрупком разрушении земных недр при землетрясении. Следовательно, непрерывные наблюдения за изменением напряжения в зонах коллизии с помощью геомеханических датчиков делают возможным прогноз сильных землетрясений не только надежным, но и краткосрочным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ившин В.М. Скважинный наклономер НИВ-1 // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 105-112.
2. Рейнер М. Деформация и течение. М.: Гостехиздат, 1963. 382 с.
3. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др. Грунтоведение. М., Издательство Московского университета, 1973. 388 с.
4. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Монахов Н.И. и др. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1969. 600 с.
5. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: Издательство Московского университета, 1995. 480 с.
6. Хан Х. Теория упругости. М.: Мир, 1988. 343 с.
7. Цитович Н.А. Механика Грунтов. М.: Высшая школа, 1968. 260 с.
8. Шаторная Н.В. Сильные землетрясения мира. В Землетрясения Северной Евразии в 1993 году. М.: НИИ Природа, 1999. С. 129-133.