

УДК 531:550.3

## **СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПОЯСЕ С ЦЕЛЮ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**Ившин В.М.<sup>1</sup>, Ившина Е.В.<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: ivt@kscnet.ru*

*<sup>2</sup>ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская обл., Ленинский р-н,  
п. Развилка, 142717; e-mail: E\_Ivshina@vniigaz.gazprom.ru*

### **Аннотация**

Показывается, что непрерывно наблюдая с помощью геомеханических датчиков за вертикальными градиентами горизонтального смещения в скальном массиве вулканического пояса на глубине около 50 м можно следить за изменением в нем тектонического давления и на основании этого осуществлять прогноз сильных землетрясений в сейсмофокальной зоне островных дуг.

### **Введение**

«В.Н. Страхов в своей статье [9], вышедшей после катастрофического Спитакского землетрясения 1988 г. и посвященной анализу проблем фундаментальной сейсмологии в области прогноза сейсмической опасности, сделал вывод о необходимости развития принципиально нового подхода – новой парадигмы для решения проблемы прогноза, базирующейся на знании физических закономерностей хрупкого разрушения, возникающего в больших массивах горных пород. Основу этой новой парадигмы должны составлять данные о природных напряжениях, структурно-вещественном строении сейсмогенных участков земной коры и исследования особенностей физических процессов, происходящих в разломных зонах» [6]. В этой связи в настоящей статье показывается, как для решения задачи прогноза сильных землетрясений в сейсмофокальной зоне Курило-Камчатской островной дуги был разработан способ непрерывного наблюдения за изменением тектонического давления в вулканическом поясе. Рассматриваются результаты наблюдений с помощью произведенных в США мелкоскважинных наклономеров модели ТМ-1В [10], которые привели к предположению, что медленные изменения сигналов наклономеров вызваны не тектоническими наклонами блоков земной коры, а изменением вертикальных градиентов горизонтального смещения, возникающих в поверхностном слое Земли под действием веса вышележащих горных пород. Обсуждаются исследования указанных градиентов смещения, выполненные геомеханическими датчиками, представляющими собой прочно связанные со средой на глубине 50 м вертикальные гильзы длиной примерно 2 м, в которых для преобразования механических сигналов в электрические закреплены специально разработанные скважинные наклономеры модели НИВ-1 [2]. Опираясь на полученные данные, утверждается, что непрерывно измеряя геомеханическими датчиками градиенты смещения в скальном массиве вулканического пояса можно непрерывно следить за изменением в нем тектонического давления. Приводятся подтверждающие это временные ряды, зафиксировавшие изменение давления в процессе подготовки сильного землетрясения в Авачинском заливе.

### Наблюдения с помощью мелкоскважинных наклономеров модели ТМ-1В

В декартовой системе координат, в которой ось OZ вертикальна, а оси OX и OY горизонтальны, вертикальные градиенты горизонтального смещения в плоскостях XOZ и YOZ равны:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_x}{\partial z} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = \varepsilon_{xz} + \gamma_{xz}, \\ \frac{\partial u_y}{\partial z} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) = \varepsilon_{yz} + \gamma_{yz},\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\varepsilon_{xz}$ ,  $\varepsilon_{yz}$  – сдвиговые деформации, связанные с изменением угла между горизонтальными и вертикальными осями;  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yz}$  – наклоны (вращения на малый угол).

В однородной среде около земной поверхности тектонические силы не создают сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{xz}$ ,  $\varepsilon_{yz}$ , то есть

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = 0, \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) = 0.\end{aligned}\quad (2)$$

На основании (2) из (1) следует:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_x}{\partial z} &= \gamma_{xz}, \\ \frac{\partial u_y}{\partial z} &= \gamma_{yz}.\end{aligned}\quad (3)$$

Соотношения (3) показывают, что медленный тектонический наклон блоков земной коры можно определить с помощью мелкоскважинных наклономеров модели ТМ-1В, измеряющих углы отклонения их продольной оси от отвесной линии в двух взаимно ортогональных плоскостях, которые при малой величине характеризуют вертикальные градиенты горизонтального смещения в этих плоскостях.

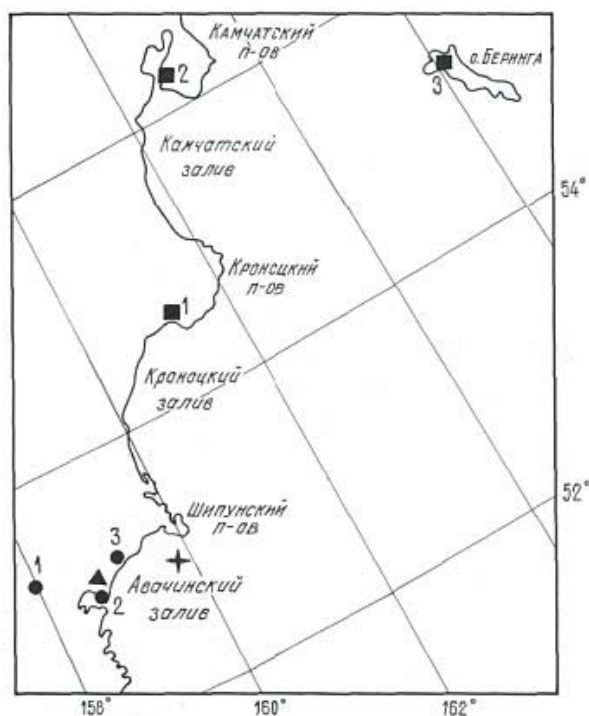
Из исследований, осуществленных в Pinon Flat Geophysical Observatory (США, Калифорния) следует, что сигналы мелкоскважинных наклономеров модели ТМ-1В за год меняются на десятки мкрад и что изменения эти обусловлены в основном атмосферным и гидросферным воздействием [11]. Поэтому наблюдения на Камчатке с помощью указанных наклономеров проводились, исходя из следующих представлений.

Атмосферные и гидросферные условия от года к году меняются незначительно и имеют ярко выраженную годовую периодичность. Значит, если при выделении линейных трендов из двухлетних временных рядов наклономера первые гармоники остатков окажутся значительно меньше вторых (годовых), то линейные тренды можно считать в первом приближении функциями, характеризующими медленные тектонические наклоны.

Для определения примерной величины тектонических наклонов на Камчатке наклономерные пункты были созданы на сейсмостанциях «Кроноки», «Крутоберегово» и «Беринг» (рис. 1). Наклономеры располагались под зданиями сейсмостанций на глубине 3 м.

Полученные двухлетние временные ряды и их линейные тренды, выделенные методом наименьших квадратов, приведены на рис. 2, 3 и 4. Горизонтальные оси на рисунках – оси

## СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПОЯСЕ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



- – наклонометры, установленные на сейсмостанциях "Кроноки" (1), «Крутоберегово» (2) и «Беринга» (3);
- – геомеханические датчики, созданные в долине р. Тополовая (1), на утесе Авачинской бухты (2) и в устье р. Налычева (3);
- ▲ – геомеханический датчик, созданный в Петропавловске-Камчатском для наблюдения за изменением тектонического давления;
- ✦ – эпицентр землетрясения 2 марта 1992 г. с  $M = 7.1$  в Авачинском заливе.

Рис. 1. Карта-схема расположения на Камчатке наклономеров ТМ-1В и геомеханических датчиков.

времени, вертикальные – оси сигналов наклономеров. Увеличение сигналов наклономеров в направлении С-Ю означает наклон на юг, а в направлении З-В – на запад.

Спектры функций, оставшихся после выделения из рядов линейных трендов, свидетельствовали, что амплитуды первых гармоник этих функций намного меньше годовых. Следовательно, линейные тренды на приведенных рисунках, меняющиеся за год более, чем на 10 мкрад, характеризуют наклоны. Однако с помощью длиннобазисных наклономеров было установлено, что изменение наклонов за год в тектонически активных районах не превышает 1 мкрад [7,12]. Большое отличие этой величины от зафиксированной скважинными наклономерами дало основание для предположения, что значительная часть найденных линейных трендов вызвана не наклонами, а изменением во времени вертикальных градиентов горизонтального смещения, обусловленных весом вышележащих горных пород. В этой связи были выполнены исследования, результаты которых обсуждаются ниже.

### **Исследования градиентов смещения, создаваемых весом вышележащих горных пород**

Поверхностный слой Земли сложен трещиноватыми и пористыми породами. С глубиной трещиноватость и пористость пород уменьшаются, а их модули упругости и коэффициент вязкости заметно возрастают [8]. На основании этого можно допустить, что в каждой точке поверхностного слоя под действием веса вышележащих горных пород развиваются сдвиговые деформации, связанные с изменением угла между взаимно ортогональными

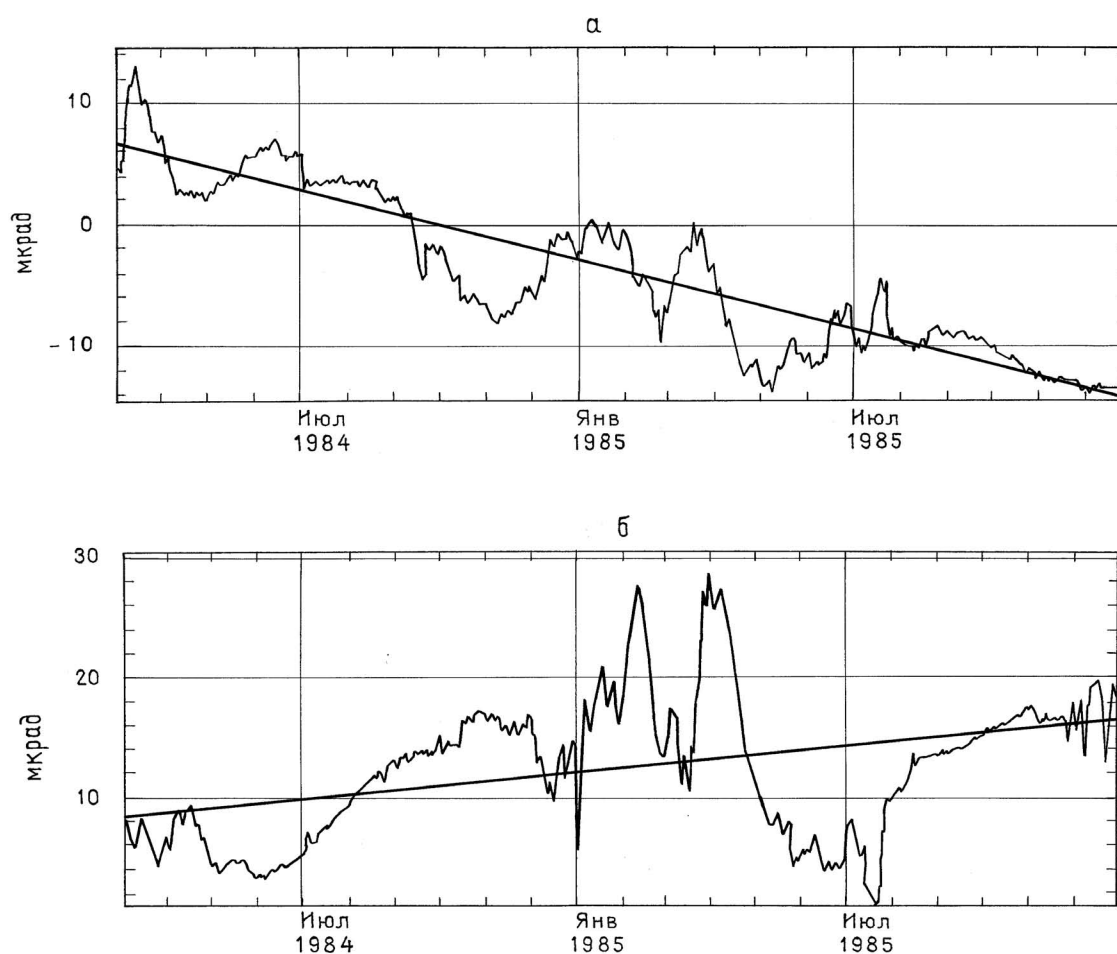


Рис. 2. Временные ряды и их линейные тренды в направлении С-Ю (а) и З-В (б) накломера ТМ-1В, установленного на сейсмостанции «Кроноки».

ми осями, направленными под углом  $45^\circ$  к горизонтальной и вертикальной плоскостям. Данные сдвиговые деформации должны приводить к горизонтальным смещениям, направление которых зависит от рельефа местности. Оценим величину смещения  $u$  в некоторой точке относительно зафиксированной в ней отвесной линии. Очевидно, что смещение  $u$  за время  $t$  будет тем значительнее, чем больше давление горных пород  $p$  и чем меньше их вязкость  $\lambda$ . Следовательно, имеем:

$$u = k \frac{p}{\lambda} t, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Поскольку  $p$  и  $\lambda$  зависят от глубины  $z$ , получим:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \left( \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial z} p \right) \frac{k}{\lambda} t. \quad (5)$$

В рыхлых отложениях с увеличением глубины происходит переход от разрушенных структур к неразрушенным, и производная коэффициента вязкости по глубине может до-

СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПОЯСЕ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

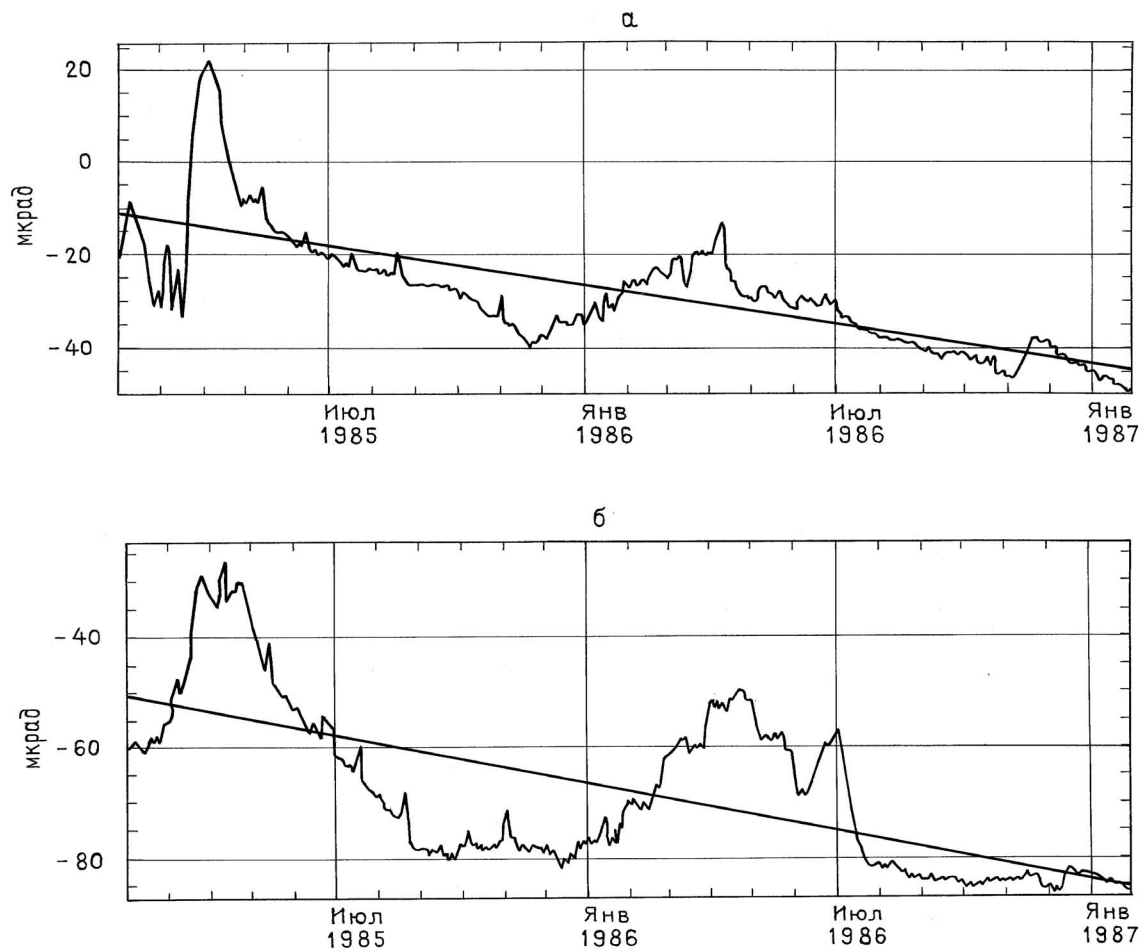


Рис. 3. Временные ряды и их линейные тренды в направлении С-Ю (а) и З-В (б) накломера ТМ-1В, установленного на сейсмостанции «Крутоберегово».

стигать значительной величины. Вследствие этого, при невысоком коэффициенте вязкости, с некоторой сравнительно небольшой глубины будет справедливо неравенство:

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial z} p \gg \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (6)$$

На основании (5) и (6) можно ожидать, что градиент смещения в рыхлых отложениях на глубине нескольких десятков метров описывается соотношением:

$$\frac{\partial u}{\partial z} \approx -\frac{k}{\lambda^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} p t. \quad (7)$$

В скальном массиве коэффициент вязкости весьма значителен и сравнительно медленно меняется с глубиной. Поэтому в нем до достаточно больших глубин выполняется неравенство:

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial z} p \ll \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (8)$$

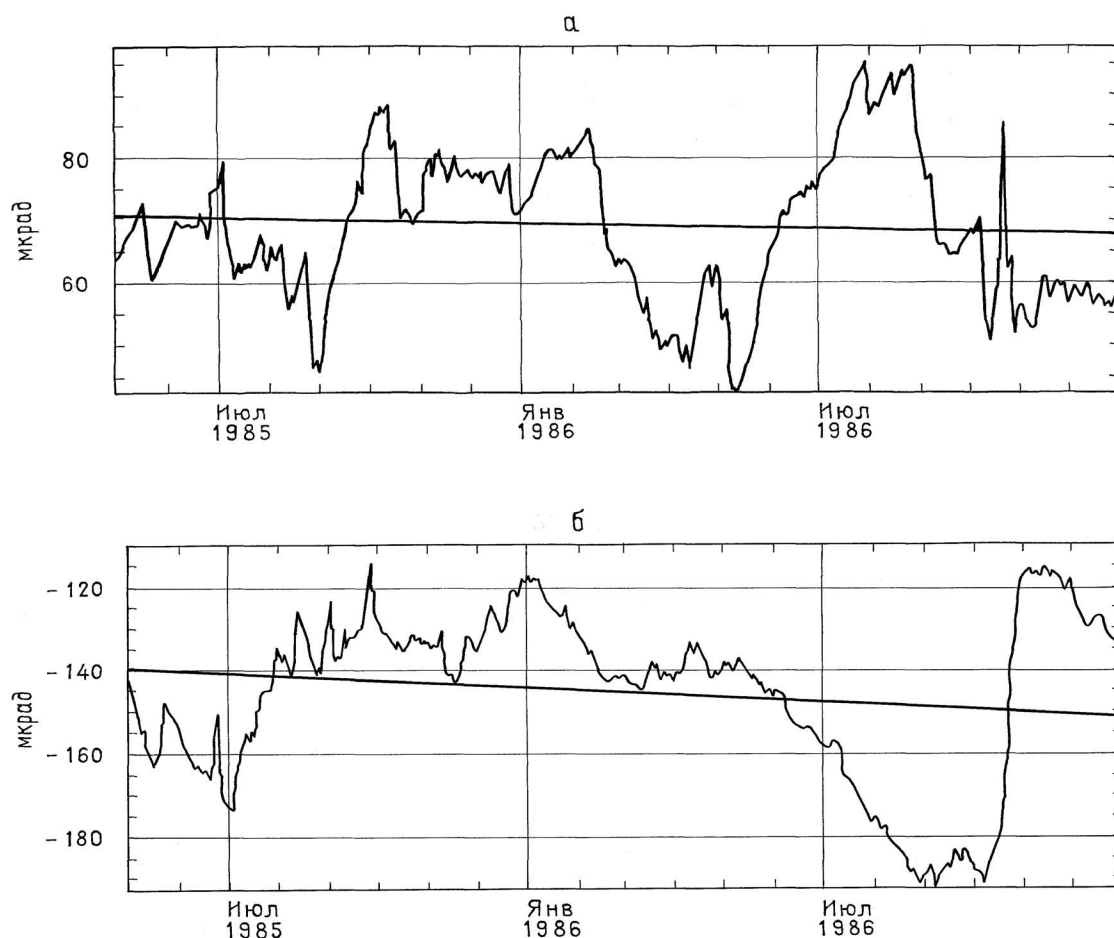


Рис. 4. Временные ряды и их линейные тренды в направлении С-Ю (а) и Э-В (б) накломера ТМ-1В, установленного на сейсмостанции «Беринг».

Сопоставляя (5) и (8) заключаем, что градиент смещения в скальном массиве на глубине нескольких десятков метров имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial z} \approx \frac{k}{\lambda} \frac{\partial p}{\partial z} t. \quad (9)$$

Из (7) и (9) следует, что каждая точка поверхностного слоя Земли на глубине нескольких десятков метров под действием веса вышележащих пород горизонтально смещается в направлении возможного деформирования с постоянной скоростью, причем в рыхлых отложениях эта скорость с глубиной уменьшается, а в скальном массиве – увеличивается.

Справедливость полученных выражений показали наблюдения, которые были проведены на Камчатке с помощью геомеханических датчиков на основании следующих соображений. Очевидно, если направление горизонтального движения верхней части датчика относительно основания совпадает с направлением возможного деформирования вмещающей среды, которое зависит от рельефа местности, то скорость смещения среды в месте расположения датчика с глубиной уменьшается, а если направление горизонтального движения верхней части датчика противоположно направлению возможного деформирования вмещающей среды, то скорость смещения среды в месте расположения датчика с глубиной

СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПОЯСЕ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

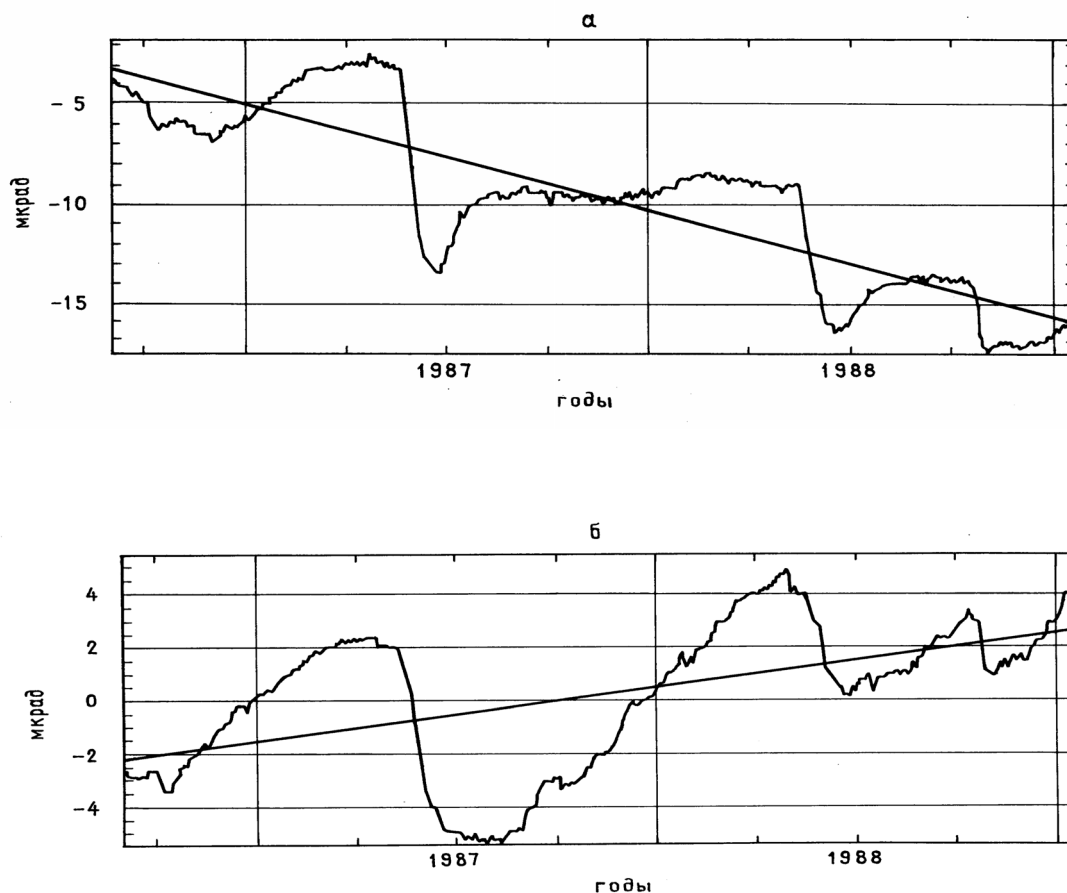


Рис. 5. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С-Ю (а) и З-В (б), характеризующие изменения вертикальных градиентов горизонтального смещения в долине р. Тополовая.

увеличивается. Следовательно, чтобы на опыте убедиться, что на глубине 50 м скорость смещения в рыхлых отложениях с глубиной уменьшается, а в скальном массиве увеличивается, необходимо и в рыхлых отложениях, и в скальном массиве на указанной глубине определить направление движения верхней части датчика относительно основания и сопоставить его с направлением возможного деформирования вмещающей среды под действием веса вышележащих пород.

Геомеханические датчики были созданы в долине р. Тополовая, на утесе Авачинской бухты и в устье р. Налычева (рис. 1). Поверхностный слой в районах Тополовского и Налычевского датчиков представляет собой рыхлые отложения, а в районе Авачинского датчика – скальный массив. Полученные на датчиках временные ряды приведены на рис. 5, 6 и 7. Горизонтальные оси на рисунках – оси времени, а вертикальные – оси углов отклонения датчиков от отвесной линии в направлении С-Ю и З-В. Увеличение рядов означает, что верхняя часть датчиков относительно основания в направлении С-Ю движется на юг, а в направлении З-В – на запад.

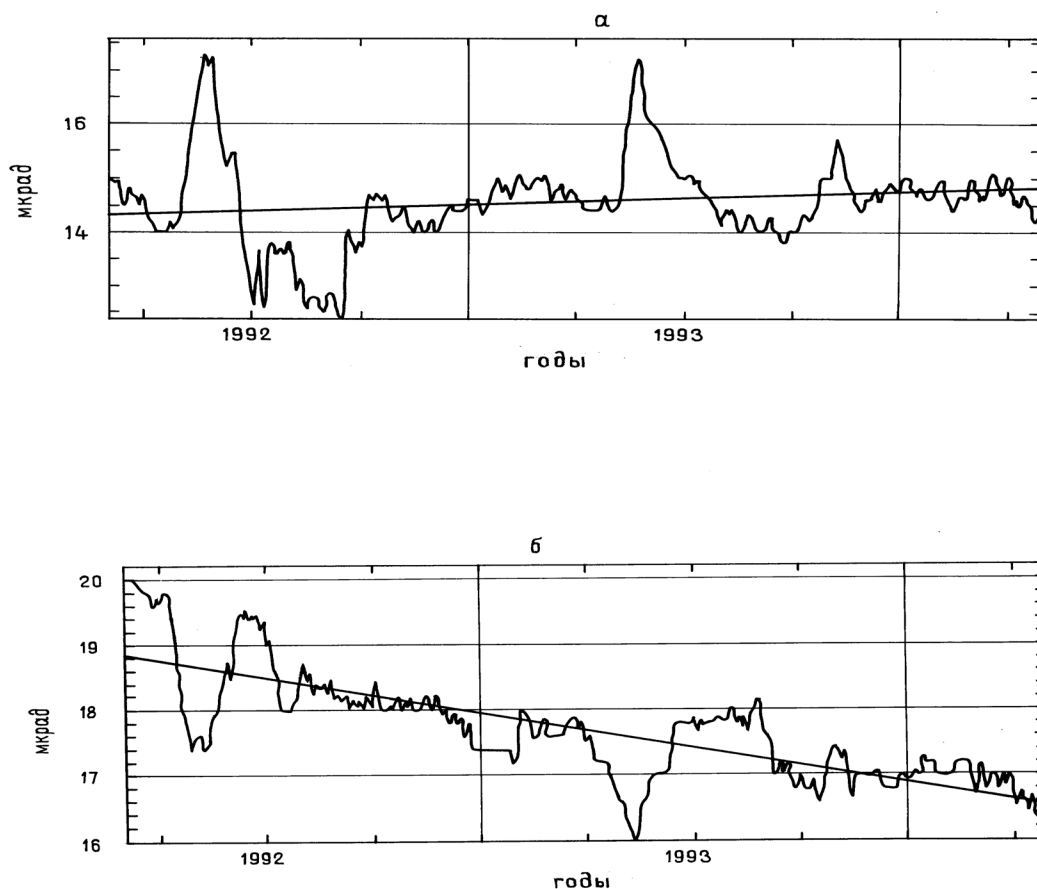


Рис. 6. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С-Ю (а) и З-В (б), характеризующие изменения вертикальных градиентов горизонтального смещения на утесе Авачинской бухты.

Наблюдения на Тополовском датчике начались в сентябре 1986 г, а закончились в январе 1989 г. Временные ряды, полученные на датчике, приведены на рис. 5. На этом рисунке изображены также линейные тренды, которые были выделены из рядов методом наименьших квадратов. На данном рисунке видно, что тренд в направлении С-Ю уменьшается, а в направлении З-В – увеличивается. Значит, верхняя часть датчика медленно двигалась на север и запад относительно основания. Вмещающая среда в районе датчика, под действием веса вышележащих пород, может деформироваться на север и запад, то есть направление движения верхней части датчика совпадало с направлением деформирования вмещающей среды. Таким образом, наблюдения на Тополовском датчике свидетельствуют о том, что скорость горизонтального смещения среды в рыхлых отложениях на глубине 50 м с глубиной уменьшается.



СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПОЯСЕ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

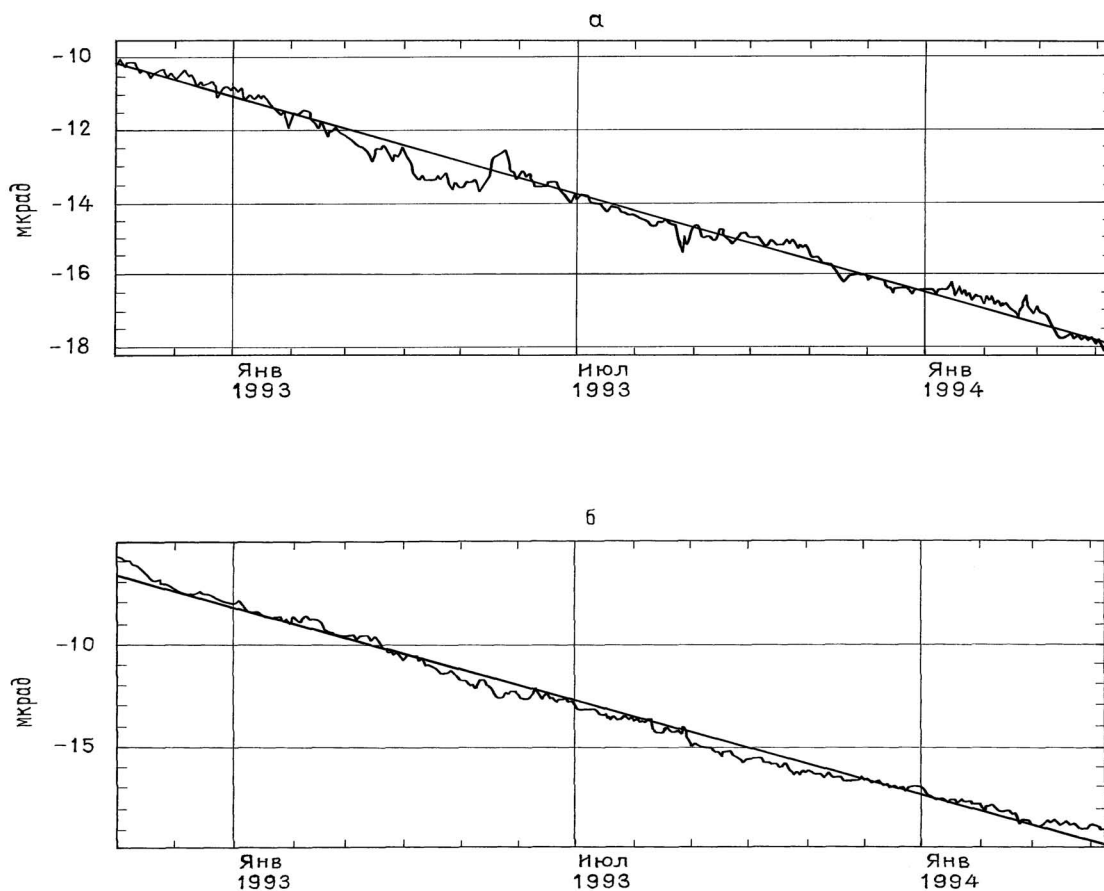


Рис. 7. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С-Ю (а) и З-В (б), характеризующие изменения вертикальных градиентов горизонтального смещения в устье р. Налычева.

Геомеханические наблюдения на утесе Авачинской бухты проводились с марта 1992 г по апрель 1994 г. Временные ряды, полученные на Авачинском датчике, и их линейные тренды приведены на рис. 6. Эти рисунки свидетельствуют, что линейный тренд в направлении С-Ю увеличивается, а в направлении З-В – уменьшается. Следовательно, верхняя часть датчика относительно основания двигалась на юг и восток. Вмещающая среда на утесе Авачинской бухты в районе датчика под действием веса вышележащих пород имеет возможность деформироваться на север и запад, то есть направление движения верхней части Авачинского датчика было противоположно направлению деформирования вмещающей среды. А это означает, что скорость горизонтального смещения среды в скальном массиве на глубине 50 м с глубиной увеличивается.

Наблюдения на Налычевском датчике были проведены для того, чтобы на опыте убедиться, что вертикальные градиенты горизонтального смещения в поверхностном слое Земли, обусловленные весом вышележащих пород меняются во времени линейно. На геомеханические датчики, кроме указанной силы, действуют силы, вызванные изменением

атмосферных и гидросферных условий. Понятно, что влияние атмосферных условий на глубине 50 м незначительно, но влияние гидросферных условий может быть заметным. Поэтому место для Налычевского датчика было выбрано там, где сезонные колебания уровня грунтовых вод малы. На рис. 7 показаны временные ряды, которые были получены на Налычевском датчике в период с ноября 1992 г. по апрель 1994 г., и их линейные тренды. Среднеквадратичные отклонения рядов от линейных трендов не превышают ошибки измерения. Следовательно, вертикальные градиенты горизонтального смещения в поверхностном слое Земли, создаваемые весом вышележащих пород, с точностью до ошибки измерения можно считать линейными функциями времени.

### **Результаты наблюдения за изменением тектонического давления**

Фронтальная часть Курило-Камчатской островной дуги под нагрузкой Тихоокеанской плиты при подготовке сильного землетрясения в сейсмофокальной зоне изгибается на вулканическом поясе как на упругом основании [4, 5]. В поверхностном слое вулканического пояса при этом возникают тектонические силы, которые горизонтальны и однородны на достаточно больших вертикальных площадках. Создаваемое этими силами трехосное напряженное состояние, из-за невозможности бокового расширения, вызывает одноосные горизонтальные деформации, приводящие к изменению объема. Так как модуль объемной деформации с глубиной растет, одноосные деформации создают в скальном массиве вертикальный градиент горизонтального смещения, который, как видно из (9), на вертикальный градиент горизонтального смещения, обусловленный весом вышележащих пород, не влияет. Следовательно, наблюдая за изменением данного градиента смещения с помощью геомеханического датчика, можно следить за изменением тектонического давления в вулканическом поясе.

Для проверки этого на опыте в Петропавловске-Камчатском, в скальном массиве у основания Петровской сопки на глубине 50 м, был создан геомеханический датчик (рис. 1). Под действием веса вышележащих пород сигнал этого датчика в направлении С-Ю во времени линейно увеличивается, а в направлении З-В – уменьшается. С ростом тектонического давления сигнал датчика увеличивается как в направлении С-Ю, так и в направлении З-В. Падение тектонического давления вызывает уменьшение сигналов датчика.

В период геомеханических наблюдений, а именно 2 марта 1992 г., на расстоянии около 100 км от Петропавловска-Камчатского произошло сильное землетрясение с  $M = 7.1$ . Эпицентр землетрясения находился в Авачинском заливе (рис. 1). Его очаг занимал диапазон глубин от 10 до 40 км. В вертикальной плоскости очаг имел эллипсообразную форму, большая ось которой наклонена на восток. В горизонтальной плоскости очаг также имел эллипсообразную форму с осями 25 и 20 км. В очаге была отмечена взбросовая подвижка по поверхности, падающей под полуостров Камчатка [1].

Временные ряды, полученные на геомеханическом датчике, представлены на рис. 8. Данные ряды свидетельствуют, что вертикальные градиенты горизонтального смещения в направлениях С-Ю и З-В до землетрясения 2 марта 1992 г. менялись во времени нелинейно, а после землетрясения – практически линейно.

### **Выводы**

По временным рядам, приведенным на рис. 8, определяется характер изменения тектонического давления на территории Петропавловска-Камчатского перед сильным землетря-

## СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПОЯСЕ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

сением в Авачинском заливе 2 марта 1992 г. Как видно на рисунке, сначала оно увеличивалось, а потом плавно уменьшалось. Это означает, что нагрузка Тихоокеанской плиты, скорость движения которой в реальном времени можно считать постоянной, в районе Авачинского залива вначале росла, а достигнув наибольшей величины, стала падать. Такой характер изменения нагрузки говорит о том, что землетрясение 2 марта 1992 г. предвлялось квазипластическими деформациями в очаге, которые начались тогда, когда напряжение в очаге стало равным пределу его прочности. С наступлением квазипластических деформаций, землетрясение как макроразрыв в условиях нагружения, когда напряжение в очаге определяется только океанской нагрузкой, становится неизбежным. Поэтому наблюдение с помощью геомеханического датчика за изменением давления в скальном массиве вулканического пояса на глубине 50 м позволяет осуществлять прогноз сильных землетрясений. Основанием для прогноза является уменьшение давления после достижения им наибольшей величины [3].

### Список литературы

1. *Зобин В.М., Гордеев Е.И., Левина В.И. и др.* Камчатское землетрясение 2 марта 1992 г. (магнитуда  $M_LH = 7.1$ ) в Авачинском заливе и связанные с ним явления // Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С. 48-61.
2. *Ившин В.М.* Скважинный наклономер НИВ-1 // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 105-112.
3. *Ившин В.М., Ившина Е.В.* Геомеханический метод прогноза сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 61-67.
4. *Ившин В.М., Ившина Е.В.* Геомеханический способ прогноза цунами в зоне островных дуг // Материалы Всероссийской научной конференции «100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908-1910 гг.». Петропавловск-Камчатский. ИВиС ДВО РАН. 2009. С. 116-123.
5. *Ившин В.М., Ившина Е.В.* О причине кривизны островных дуг // Вулканизм и геодинамика: Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т.1. Петропавловск-Камчатский. ИВиС ДВО РАН. 2009. С. 67-70.
6. *Ребецкий Ю.Л.* Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения // Геофизический журнал. 2007. Т. 29. № 6. С. 96-114.
7. *Рикитакэ Т.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
8. *Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др.* Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 123.
9. *Страхов В.Н.* К новой парадигме сейсмологии // Природа. 1989. № 12. С. 4-9.
10. *Wyatt F., Berger J.* Investigations of Tilt Measurements Using Shallow Borehole Tiltmeters // J. Geophys. Res. 1980. 85. pp. 4351-4362.
11. *Wyatt F., Morrissey S.T., Agnew D.C.* Shallow Borehole Tilt: A Reprise // J. Geophys. Res. 1988. 93. pp. 9197-9201.
12. *Wyatt F., Bilham R., Beavan J., Sylvester A.G., et al.* Comparing tiltmeters for crustal deformation measurement a preliminary report // Geophys. Res. Lett. 1984. 11. pp. 963-966.