

УДК 550.34

К ВОПРОСУ О СУЩЕСТВОВАНИИ ПРИЛИВНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**В.А. Салтыков, В.В. Иванов**

*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail: [salt@emsd.iks.ru](mailto:salt@emsd.iks.ru)*

Введение

Вопрос о воздействии земных приливов на сейсмичность имеет достаточно долгую историю и многие научные статьи посвящены этой проблеме. Следует отметить, что полученные результаты не всегда однозначны. В настоящее время эта тема продолжает привлекать внимание исследователей [4, 5], причем авторы допускают, что приливные эффекты в сейсмичности не постоянны.

В работе [3] было предложено рассмотреть воздействие приливов на слабую сейсмичность в очаговой зоне будущего сильного землетрясения, и на примере четырех сильных камчатских землетрясений показано, что в течение нескольких лет в будущем очаге наблюдается статистическое соответствие времени возникновения слабых землетрясений фиксированным фазам некоторых приливных волн. Преимущество такого подхода, когда рассматривается связь землетрясений с отдельными приливными волнами, а не с приливом в целом,

состоит в том, что мы не ограничены рамками какой-то определенной модели воздействия приливов. Напротив, полученные результаты могут быть использованы для создания адекватной модели связи землетрясений с приливами.

Однако, принимая во внимание различные работы по предвестникам сильных землетрясений, где отмечаемые аномальные проявления прогностических параметров наиболее ярки в окрестности очага, а не в самом очаге, ограничение рассматриваемой пространственной области лишь очагом будущего землетрясения представляется недостаточно обоснованным.. Поэтому в качестве задачи ставится обнаружение в пространственно-временной области таких зон, в которых наблюдается приливное воздействие на слабую сейсмичность. В данной работе предлагается методика решения этой задачи и результаты ее применения на примере сильного камчатского землетрясения 13 ноября 1993 г.  $M_w=7.0$ .

### Методика

Исходные данные. Рассматриваются каталоги землетрясений, полученные Камчатской опытно-методической сейсмологической партией Геофизической службы РАН. Моментные магнитуды сильных землетрясений взяты на сайте NEIC (<http://wwwneic.cr.usgs.gov>). Предварительно каталоги очищались от афтершоков сильных землетрясений программой, любезно предоставленной В.Б. Смирновым.

На момент каждого землетрясения  $t_j$  рассчитываются значения фаз основных волн приливного гравитационного потенциала  $\varphi_i(t_j)$ , где  $i$  - тип приливной волны. К основным волнам относятся  $O_1$  (период  $T=25.82$  час.),  $K_1$  ( $T=23.93$  час.),  $P_1$  ( $T=24.07$  час.),  $Q_1$  ( $T=26.87$  час.),  $M_2$  ( $T=12.42$  час.),  $S_2$  ( $T=12.82$  час.),  $N_2$  ( $T=12.66$  час.) [1].

Каталог землетрясений, очищенный от афтершоков и дополненный полями полученных фаз приливных волн, является базой для дальнейших расчетов.

Статистические параметры, характеризующие приливной эффект. Предполагается, что, если существует связь землетрясений с приливами, то это проявится в соответствии времени возникновения землетрясений определенным фазам приливных волн. Для статистической оценки этого эффекта предлагается использовать распределение Мизеса [2], применяемое для угловых величин, которыми и являются фазы приливных волн, и описываемое функцией распределения:

$$f(\varphi) = \exp[K \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)] / [2\pi \cdot J_0(K)],$$

где  $K$  - концентрация,  $\varphi$  - фаза приливной волны, имеющая среднее значение  $\varphi_0$ ,  $J_0(K)$  - функция Бесселя. Концентрация  $K$  является мерой «предпочтительной ориентировки» фаз: чем выше значение  $K$ , тем меньше разброс фаз  $\varphi$  относительно их среднего значения  $\varphi_0$ .

Пространственная область. Очаг сильного землетрясения определяется в пространстве как  $2\text{-}\sigma$  эллипс рассеяния эпицентров его афтершоков (рис. 1). Вся область поиска «приливных» землетрясений ограничивается  $10\text{-}\sigma$  эллипсом рассеяния его афтершоков.

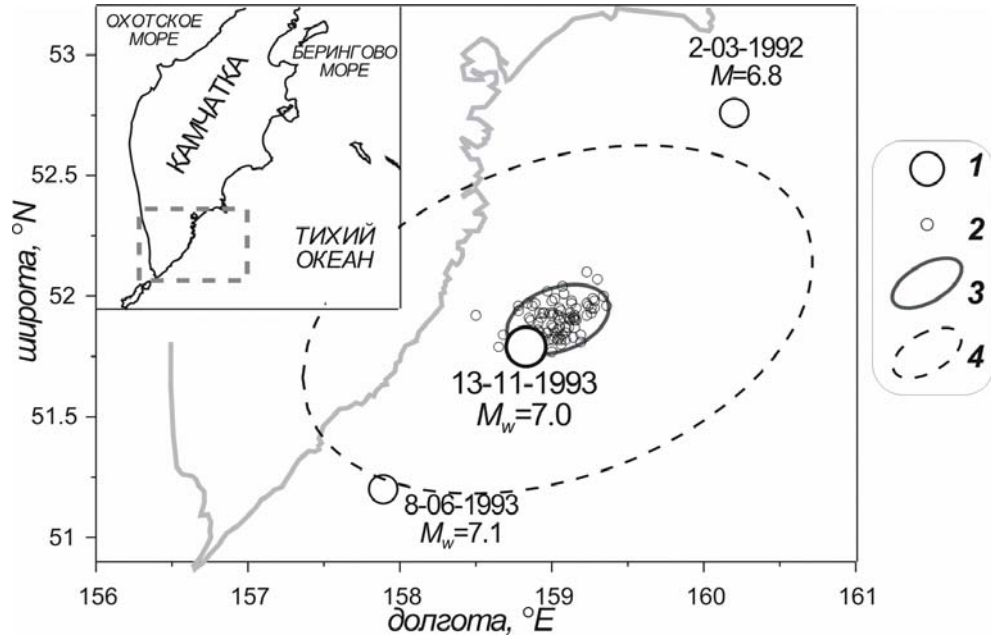


Рис. 1. Схема Южной Камчатки с отмеченными эпицентрами сильных землетрясений 1992-1993 гг. (1) и афтершоками землетрясений 13 ноября 1993 г. (2). Очаг землетрясения аппроксимируется эллипсом (3), зона поиска аномалий околонуена эллипсом (4).

Параметры сканирования. Вся определенная выше пространственная область сканируется эллипсами. При этом меняются 6 параметров: положение центра эллипса - широта  $\varphi_0$ , долгота  $\lambda_0$ ; длина полуосей эллипса -  $a$ ,  $b$ ; азимут первой полуоси -  $\beta$ ; длина анализируемого временного интервала  $T$  перед сильным землетрясением.

Отбор аномальных эллипсов. Для каждой комбинации этих параметров

- из каталога выделяются землетрясения, попадающие в обозначенные пространственно-временные рамки;
- рассматриваются соответствующие им фазы приливных волн;
- рассчитываются параметры распределения фаз для каждого типа приливной волны: среднее значение фазы  $\varphi_0$ , концентрация  $K$  и ее критическое значение  $K_{cr}$  по уровню значимости  $\alpha=0.01$ ;
- эллипс считается «элементарной» аномалией по  $i$ -ой приливной волне, если концентрация  $K$  больше  $K_{cr}$ .

Объединение «элементарных» эллипсов в группы. Обнаружено, что «элементарные аномалии» по каждой приливной волне образуют группы в пространстве, и средние фазы волн для эллипсов, входящих в такую группу, имеют близкие значения. Идентифицируемые

по положению центра эллипса и значению фазы группы представляется целесообразным объединить в «аномальные зоны».

Выделение аномальных зон. Для каждой приливной волны  $i$  и временного интервала  $T$  выделяются группы «элементарных» эллипсов. Затем для каждой группы проводится:

- выделение из каталога всех землетрясений, попадающих в эллипсы группы;
- расчет  $1-\sigma$  эллипса рассеяния этих землетрясений, который образует «ядро» предполагаемой аномалии;
- определение приливной фазы и параметров ее распределения для ядра аномалии;
- ядро является аномальной зоной, если концентрация  $K$  больше  $K_{cr}$  по задаваемому уровню значимости  $\alpha=0.01$  (или 0.05).

### Результаты и их обсуждение

Землетрясение 13 ноября 1993 г. с магнитудой  $M_w=7.0$  ( $\varphi=51.79^\circ N$ ,  $\lambda=158.83^\circ E$ ,  $h=40$  км) сопровождалось афтершоковой последовательностью, по которой были оконтурены его очаг и область, в которой идет поиск приливных аномалий, как  $2-\sigma$  и  $10-\sigma$  эллипсы рассеяния афтершоков (рис. 1). Эта область захватывает своими северо-восточным и юго-западным окраинами очаги двух других сильных землетрясений 1992-93 гг. - 2 марта 1992 г.  $M_s=6.8$  и 8 июня 1993 г.  $M_w=7.1$ , но для самой области землетрясение 13 ноября 1993 г.  $M_w=7.0$  является сильнейшим за весь предыдущий период детальных сейсмологических наблюдений (с 1962 г.).

Нижний порог надежной регистрации землетрясений составляет для исследуемого района по классу  $K_s=8.5$ . Для расчетов использовались землетрясения, превышающие этот порог. По описанной выше методике проведено сканирование эллипсами с последующим выделением аномальных зон с  $K \geq K_{cr}$  по уровню значимости  $\alpha=0.01$ .

Наибольшее количество аномалий выявлено для волн  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $Q_1$ ,  $M_2$ ,  $N_2$ , для волн  $P_1$ ,  $S_2$  - в  $\approx 3$  раза меньше. Обращают на себя внимание отдельные случаи пространственного совпадения аномальных зон, полученных по различным приливым волнам. Это является косвенным подтверждением неслучайности обнаруженных эффектов.

Рассмотрим аномалии в районе очага этого землетрясения. На рис. 2 кроме аномалий с  $K \geq K_{cr}$  ( $\alpha=0.01$ ) отмечены аномалии менее надежные - с  $K \geq K_{cr}$  ( $\alpha=0.05$ ). Качественно картина при этом почти не изменилась: так же как и ранее большинство аномалий получено по волнам  $O_1$ ,  $M_2$ ,  $N_2$ , но доля аномалий по волнам  $K_1$ ,  $Q_1$  уменьшилась в несколько раз. Благодаря снижению уровня значимости представленных аномалий, стало возможным проследить эволюцию конкретных аномалий при изменении временного окна. Среди множества аномалий, соответствующих различным типам волн, можно выделить несколько, которые прослеживаются в приблизительно одном месте для различных временных интервалов. В частно-

сти, это аномалии  $O_1$  и  $N_2$  (отмечены знаком \* на рис. 2). Зависимость концентрации  $K$  от величины временного окна  $T$  представлена на рис. 3. Наиболее ярко аномалии проявляются для временных интервалов  $T$  в диапазоне 2-6 лет, когда концентрация  $K$  превышает 1, то есть распределение является не только статистически значимым, но и достаточно эффективным: при  $K=1$  половина использованных землетрясений имеет фазы, попадающие в сектор

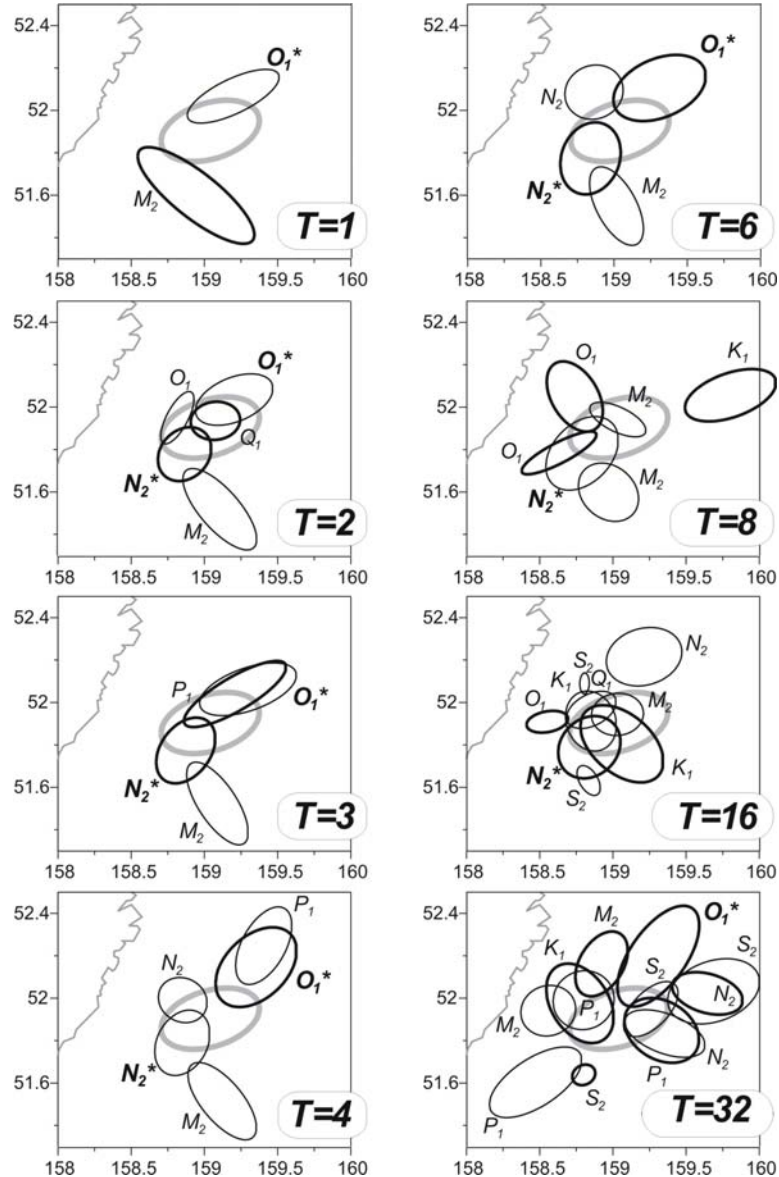


Рис. 2. Аномальные зоны, приближенные к очагу сильного землетрясения, с концентрацией  $K \geq K_{cr}$  по уровню значимости  $\alpha=0.01$  (толстые линии) и  $0.05$  (тонкие линии) для приливных волн  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $M_2$ ,  $S_2$  и  $N_2$ . Тип волны, для которой получена аномальная зона, указан рядом с эллипсом. Величина временного интервала  $T$  в годах указана на каждом рисунке.

шириной около  $\pi/2$ . При больших значениях  $T$  величина  $K$  уменьшается, хотя и остается статистически значимой. Это может быть связано как с существованием фонового режима приливного воздействия (хотя и достаточно слабого) на сейсмичность в отдельных блоках среды, так и с последствиями существования яркой, но кратковременной (в течение нескольких лет) приливной аномалии, которая проявляется при статистической обработке больших временных интервалов.

## Выводы

Предложена методика выделения пространственных зон, в которых в течение некоторого интервала времени (в рамках данной работы - перед сильным землетрясением) слабая сейсмичность коррелирует с земными приливами.

Показано, что в области очага землетрясения 13 ноября 1993 г.  $M_w=7.0$  существуют зоны, в пределах которых время возникновения слабых ( $K \geq 8.5$ ) землетрясений соответствует

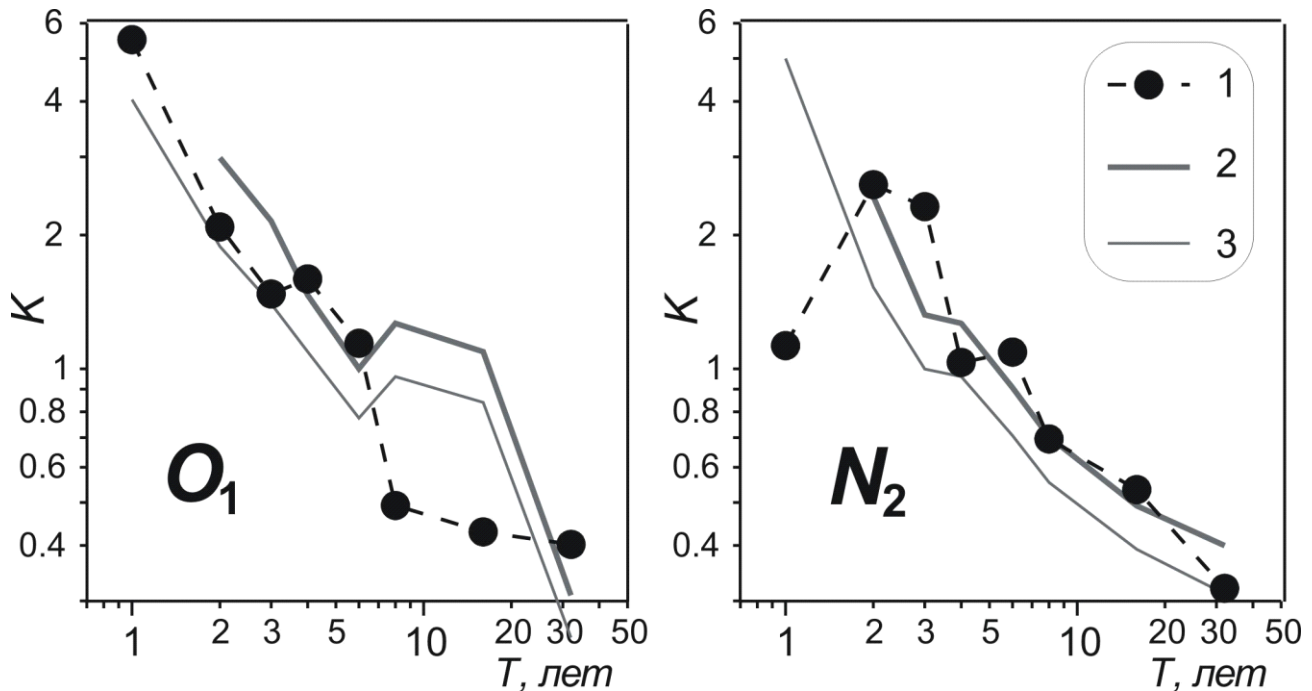


Рис. 3. Графики зависимости концентрации  $K$  от величины временного окна  $T$  для аномалий (1), полученных для волн  $O_1$  и  $N_2$  отмеченных знаком \* на рис. 2. Отмечены критические значения концентрации  $K_{cr}$  по уровню значимости  $\alpha=0.01$  (2) и  $\alpha=0.05$  (3).

определенным фазам земных приливов на протяжении нескольких лет перед основным событием. Размер зон сравним с размерами очага.

Отклик слабой сейсмичности на воздействие различных приливных волн не одинаков. Волны  $O_1$ ,  $M_2$ ,  $N_2$  проявляются наиболее ярко.

Полученные результаты подтверждают предположение о переменном характере влияния приливов на слабую сейсмичность. Перед сильным землетрясением состояние среды изменяется, это проявляется в локальной изменчивости ее тензочувствительности и избирательности отклика на приливное воздействие.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант 01-05-65325а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
2. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.
3. Салтыков В.А. О воздействии земных приливов на сейсмические процессы // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока / под ред. Викулина А.В. Петропавловск-Камчатский, 2000. С. 12-21.
4. Тюпкин Ю.С. Модулирование слабой сейсмичности приливными деформациями перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 3-10.
5. Tanaka S., Ohtake M., Sato H. Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data // Journal of Geophysical Res. V. Solid Earth. 2002. V. 107. N 10.