

УДК 550.34

## ВАРИАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧНОСТИ, СВЯЗЫВАЕМЫХ С ЗЕМНЫМИ ПРИЛИВАМИ

В.А. Салтыков<sup>1,2</sup>, В.В. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Камчатский государственный педагогический университет, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4;

<sup>2</sup> Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН, 680006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйна, 9; e-mail: salt@emsd.iks.ru

Исследуется воздействие земных приливов на сейсмичность. При этом рассматриваются землетрясения с магнитудой  $M > 2.6$ . На примере трех сильных Камчатских землетрясений 1993-96 гг. показано, что во время подготовки землетрясения с  $M \geq 7.0$  в течение нескольких лет в очаговой зоне будущего землетрясения наблюдается статистическое соответствие времени возникновения слабых землетрясений фиксированным фазам приливных волн. Подобные эффекты наблюдаются и в высокочастотном сейсмическом шуме (ВСШ, амплитуда -  $10^{-12}$ -  $10^{-9}$  м, частота - первые десятки Гц): начальная фаза приливной компоненты огибающей ВСШ постоянна в течение нескольких месяцев перед сильным землетрясением.

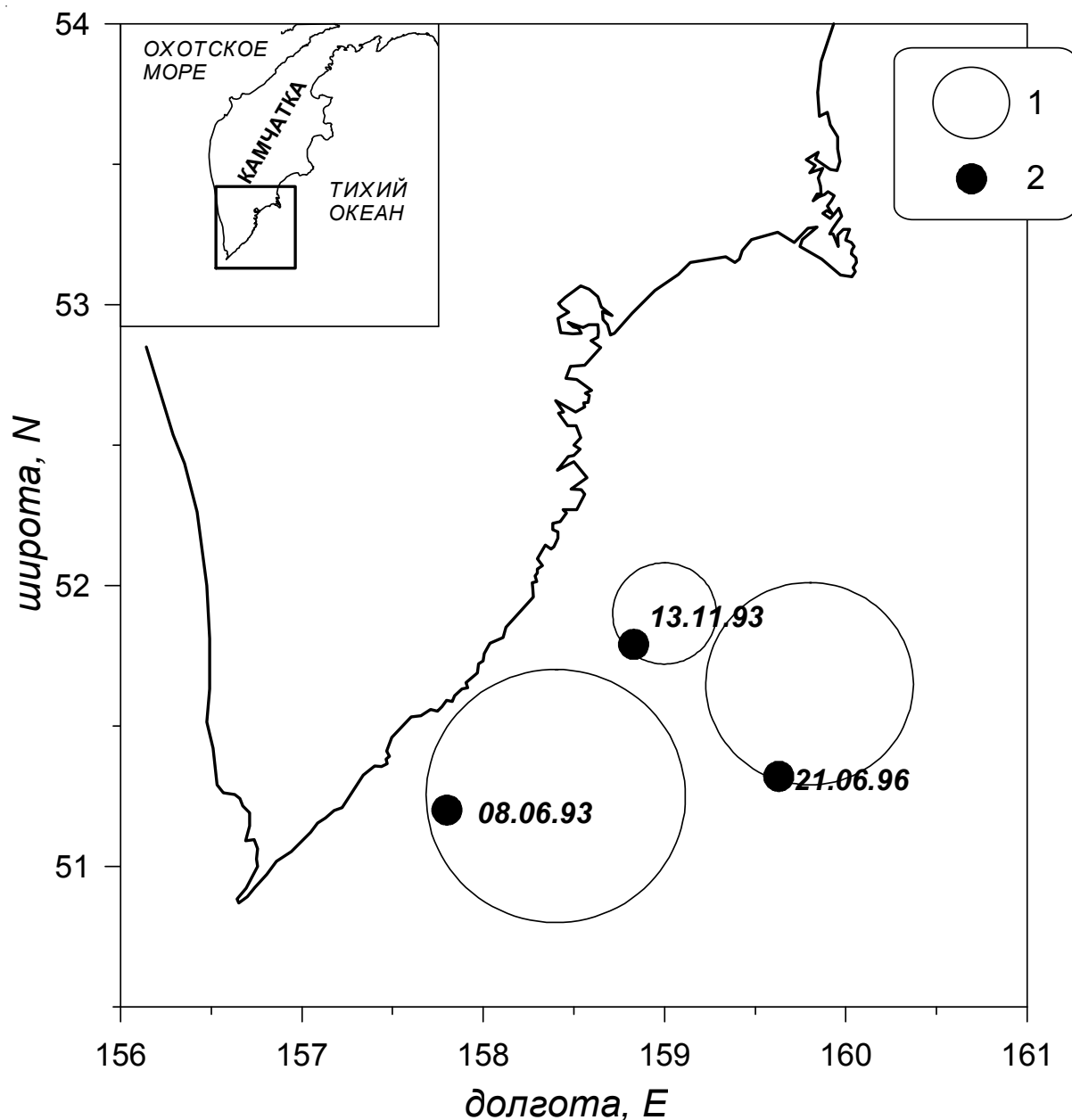
**Постановка задачи.** Вопрос о воздействии земных приливов на сейсмичность имеет достаточно долгую историю, и многие научные статьи посвящены этой проблеме. Тем не менее получаемые результаты неоднозначны. Существует ряд работ с положительными выводами о приливном воздействии (Heaton, 1975; Polombo, 1986; Weems, Perry, 1989), но многие исследователи не разделяют эту точку зрения (Knopoff, 1964; Shlien, 1972; Simpson, 1967). Однако, можно предположить, что приливные эффекты в характеристиках сейсмичности имеют временной характер и зависят от ряда факторов, одним из которых может быть изменение напряженного состояния среды в период подготовки сильного землетрясения. Тогда следует рассмотреть фоновую сейсмичность, предшествующую сильному землетрясению, в пространственной области, соответствующей очагу этого сильного землетрясения, где напряженное состояние среды меняется в наибольшей степени и ожидаемые приливные эффекты могут проявиться наиболее ярко.

**Исходные данные и методика анализа.** Ниже рассматриваются три сильных землетрясения, произошедшие на юге Камчатки: 8 июня 1993 ( $M_w = 7.1$ ,  $\varphi = 51.20^\circ N$ ,  $\lambda = 157.80^\circ E$ ,

$h = 40$  км), 13 ноября 1993 ( $M_w = 7.0$ ,  $\varphi = 51.79^\circ N$ ,  $\lambda = 158.83^\circ E$ ,  $h = 40$  км) и 21 июня 1996 ( $M_w = 7.0$ ,  $\varphi = 51.69^\circ N$ ,  $\lambda = 159.52^\circ E$ ,  $h = 3$  км) (рис. 1). Исследуемая пространственная зона определяется положением афтершоков этих землетрясений (рис. 1) и представляет собой цилиндры с радиусом 50, 20 и 40 км, соответственно. По вертикали объемы ограничиваются глубиной землетрясений, что составляет для этих зон - 0 - 100 км.

Уровень надежной регистрации землетрясений Камчатской сеймометрической сетью соответствует для данного района магнитуде  $M = 2.6$ . При анализе рассматриваются землетрясения за период 1962-1996 гг. с магнитудами  $M \geq 2.6$ . Предварительно каталоги землетрясений очищались от афтершоков всех сильных землетрясений, так как особенности афтершокового процесса могут исказить ожидаемый приливной эффект.

Рассматривается воздействие на сейсмичность четырех приливных волн -  $O_1$  (период  $T = 25.82$  ч.),  $K_1$  ( $T = 23.93$  ч.),  $M_2$  ( $T = 12.42$  ч.) и  $S_2$  ( $T = 12.00$  ч.) (Melchior, 1968), которые, в основном, и определяют приливной процесс. Фазы этих волн приливного гравитационного потенциала рассчитывались для времени каждого слабого землетрясения, произошедшего в очаговой зоне одного из



**Рис. 1.** Карта Южной Камчатки. Отмечены эпицентральные зоны (1) трех сильных землетрясений (2), рассматриваемые в работе.

выбранных сильных землетрясений. Целью дальнейшего анализа является выделение связи этих фаз с подготовкой сильного землетрясения.

Во многих работах отмечено статистическое свойство возможной связи между землетрясениями и приливами, поэтому временные ряды «оригинальных» фаз не дают представления о связи сейсмичности с земными приливами. Тенденции этой связи могут выявляться в вариациях параметров распределения фаз, которые вычисляются в соответствии с распределением фон Мизеса (Von Mises), описываемым функцией распределения (Мардиа, 1978):

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

где  $k$  - концентрация,  $\varphi$  - фаза приливной волны, имеющая среднее значение  $\varphi_0$ ,  $J_0(k)$  - функция Бесселя. Целям данной работы соответствует анализ вариаций концентрации  $k$ , которая является мерой «предпочтительной ориентировки» фаз. Чем выше значение  $k$ , тем меньше разброс фаз относительно среднего значения. При  $k=0$  распределение фаз соответствует равномерному.

Дальнейший анализ сводится к:

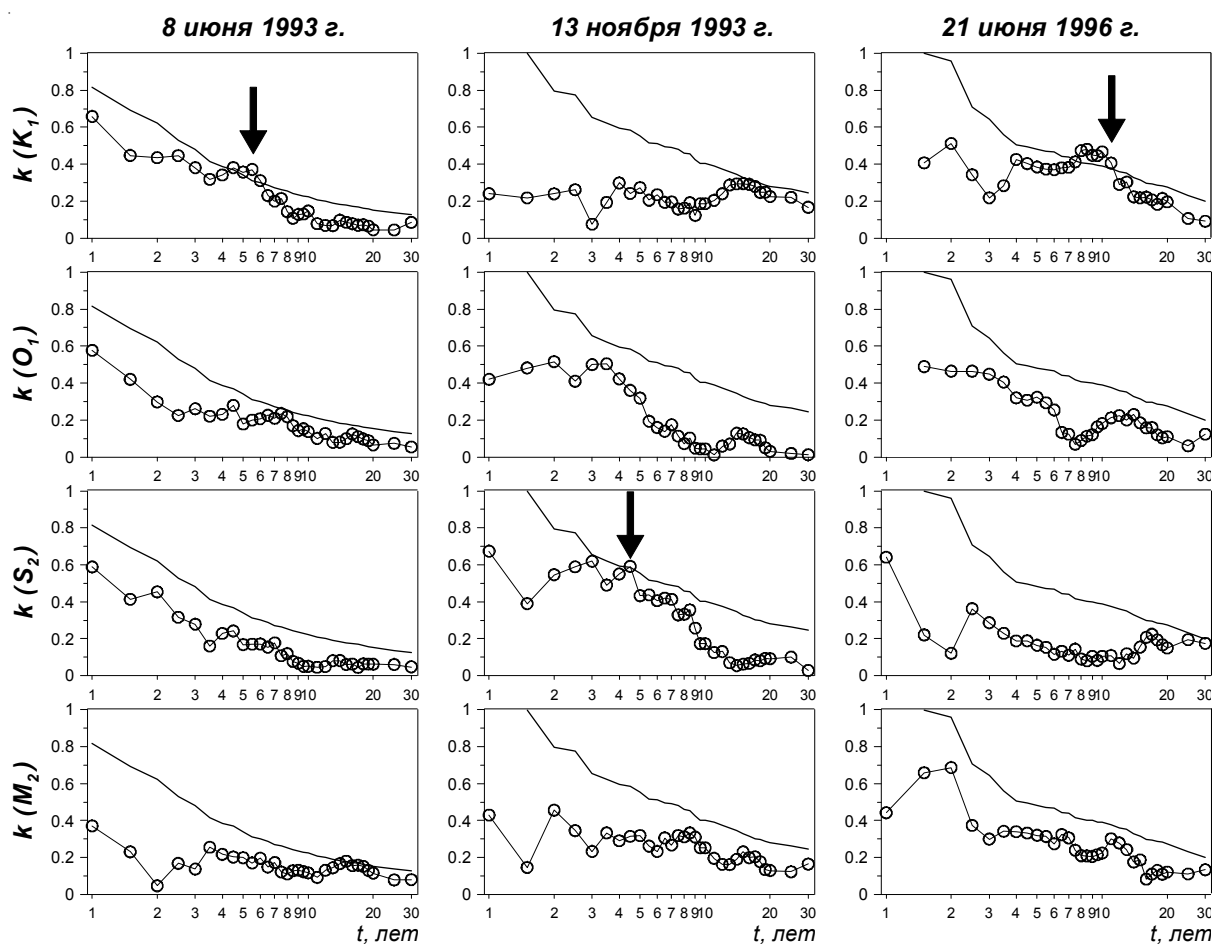
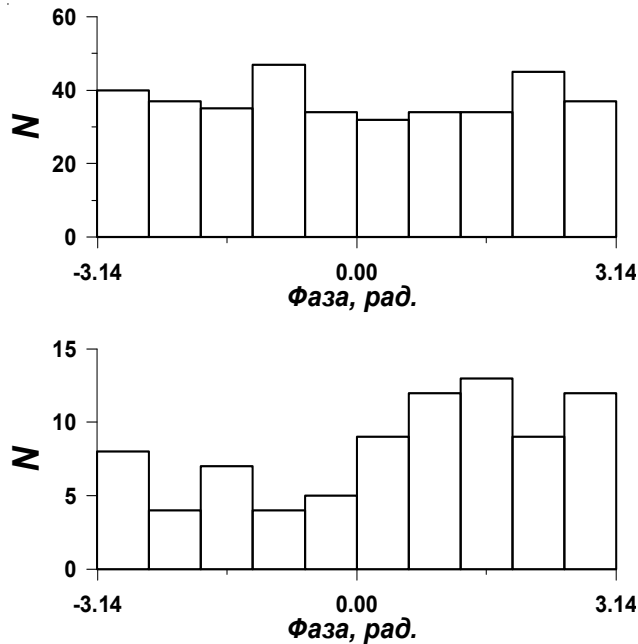


Рис. 2. Зависимость величины концентрации  $k$  распределения фаз приливных волн ( $O_1$ ,  $K_1$ ,  $M_2$  и  $S_2$ ) от размера временного интервала  $t$  перед тремя сильными землетрясениями. Сплошная линия - критическое значение концентрации  $k_{cr}$  с уровнем значимости 0.05. Стрелкой указано максимальное  $t$  при условии  $k > 0.35$

- определению концентрации  $k$  для фаз приливных волн, соответствующих землетрясениям, попавшим в определенное временное окно;
- определению критического значения концентрации  $k$  (0.05), соответствующего уровню значимости 0.05;
- выявлению временных интервалов, когда: 1) наблюдаемая концентрация  $k$  превышает  $k$  (0.05), то есть значимо отличается от равномерного, и 2) значение  $k$  больше 0.35. (Второе условие достаточно произвольно и является следствием требования, чтобы распределение фаз было достаточно эффективным: при таком  $k$  максимальное значение функции распределения превышает минимальное в два раза);
- определению максимального временного интервала, удовлетворяющего вышеперечисленным условиям, для каждой приливной волны и перед каждым сильным землетрясением.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 2 представлены результаты расчетов концентрации  $k$  в различных временных окнах перед тремя вышеупомянутыми сильными землетрясениями. На графиках видно, что перед землетрясениями 8 июня 1993 г., 13 ноября 1993 г. и 21 июня 1996 г. наблюдается значимое отклонение от равномерного распределения фаз лишь одной приливной волны: в двух случаях - это  $K_1$  и в одном -  $S_2$ . Временные интервалы при этом достаточно разнообразны - от 4.5 до 11 лет. При дальнейшем увеличении временного интервала концентрация  $k$  уменьшается, то есть распределение становится более равномерным (рис. 2,3).

Подобные вышеописанным приливные эффекты выявлены также в исследованиях высокочастотного сейсмического шума. Высокочастотный сейсмический шум (ВСШ) - это сейсмические колебания с амплитудой  $10^{-12}$  -  $10^{-9}$  м и частотой в диапазоне первых десятков Гц.



**Рис. 3.** Пример распределения землетрясений с  $M > 2.6$ , происшедших в 1962-96 гг. (вверху) и в 1986-96 гг. (внизу) в очаговой зоне землетрясения 21 июня 1996 г., по величине фазы приливной волны  $K_1$ .

Организация и проведение долговременных наблюдений ВСШ на Камчатке позволили получить следующие результаты: компоненты, связанные с воздействием приливных волн  $K_1$  (период  $T=23.93$  ч.),  $P_1$  ( $T=24.07$  ч.),  $O_1$  ( $T=25.82$  ч.),  $Q_1$  ( $T=26.87$  ч.),  $K_2$  ( $T=11.97$  ч.),  $S_2$  ( $T=12.00$  ч.),  $M_2$  ( $T=12.42$  ч.) были выделены из огибающей ВСШ (Салтыков и др., 1997а). Кроме того, было обнаружено, что в различных временных интервалах отклик ВСШ на приливное воздействие меняется (Салтыков, 1995). Гипотеза о связи приливной компоненты ВСШ с напряженным состоянием среды (в частности, с подготовкой сильного землетрясения) была подтверждена анализом данных ВСШ за 1992-1998 гг. Перед всеми одиннадцатью землетрясениями с  $M > 6$ , произошедшими за это время на расстоянии до 250 км от пункта регистрации ВСШ, стабилизация начальной фазы огибающей компоненты ВСШ, вызванной приливной волной  $O_1$ , наблюдалась в течение 1-3 месяцев (Салтыков и др., 1997б, 1998).

Высокочастотный сейсмический шум рассматривается как часть единого сейсмического процесса, но на более низком энергетическом уровне. Самоподобие сейсмического процесса предполагает идентичные тенденции процессов на различных пространственно-временных и

энергетических масштабах. Обнаруженное в фоновой сейсмичности проявление приливных эффектов (а именно - соответствие времени возникновения слабых землетрясений определенным фазам приливных волн в период подготовки сильного землетрясения) представляется аналогом стабилизации начальной фазы приливной компоненты огибающей высокочастотного сейсмического шума (Салтыков и др., 1997б, 1998). Однако временные интервалы их проявления различны (годы - для землетрясений и месяцы - для ВСШ), а энергетические масштабы землетрясений и ВСШ несоизмеримы.

**Выводы.** Полученные результаты демонстрируют новый аспект влияния земных приливов на сейсмический процесс - соответствие слабых землетрясений, происходящих в очаговой зоне будущего сильного землетрясения, фиксированным значениям фаз приливных волн в течение нескольких лет перед самым сильным землетрясением. При этом отмечается статистическая связь сейсмичности с приливами. В то же время, показано отсутствие этой связи на больших интервалах наблюдений.

Вторым результатом является обнаружение сходных тенденций в сейсмическом процессе на различных энергетических масштабах - землетрясения с магнитудой более 2.6 и высокочастотный сейсмический шум. Это представляет интерес как пример самоподобия сейсмического процесса.

Авторы благодарны В.Б. Смирнову за обсуждение результатов и за предоставление программы выделения афтершоков сильных землетрясений.

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

### Список литературы

- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
- Мардиа К.* Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.
- Салтыков В.А.* Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // Докл. РАН. 1995. Т. 341. № 3. С. 406-407.
- Салтыков В.А., Синицын В.И., Чебров В.Н.* Изучение высокочастотного сейсмического шума

## ВАРИАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧНОСТИ

по данным режимных наблюдений на Камчатке // Изв. РАН. Физика Земли. 1997а. № 3. С. 39-47.

*Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // Вулканология и сейсмология. 1997б. № 4. С. 73-83.

*Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* Использование высокочастотного сейсмического шума для среднесрочного прогноза сильных камчатских землетрясений // «Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия». Петропавловск-Камчатский: из-во КГАРФ, 1998. С. 99-106.

*Heaton T.H.* Tidal triggering of earthquakes // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1975. V. 43. P. 307-326.

*Knopoff L.* Earth tides as triggering mechanism for earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1964. V. 54. P. 1865-1870.

*Polumbo A.* Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1986. V. 84. № 1. P. 93-99.

*Shlien S.* Earthquake-tide correlation // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1972. V. 28. P. 27-34.

*Simpson J.F.* Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes // Earth and Planet. Sci. Lett. 1967. V. 2. P. 473.

*Weems R.E., Perry W.H.* Strong correlation of major earthquakes with solid-earth tides in part of the eastern United States // Geology. 1989. V.17. P. 661-664.

## Variations of Seismicity Parameters Connected with Earth Tides

V. A. Saltykov<sup>1,2</sup>, V. V. Ivanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kamchatkan State Pedagogical University Kamchatkan, 383032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya street, 4*

<sup>2</sup>*Kamchatkan Seismological Department, Geophysical Service, 683006 Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip blvd., 9*

The influence of earth tides upon seismicity is investigated. Thus the various power levels of seismicity are considered: earthquakes with magnitude  $M > 2.6$ . It is shown, that in the time of preparation of three strong Kamchatkan earthquake with  $M \approx 7.0$  the conformity of weak earthquake moment to fixed values of tidal wave phase is observed during several years. The similar effect is observed in the high-frequency seismic noise (HFSN, amplitude -  $10^{-12}$ -  $10^{-9}$  m, frequency - first tens Hz) too: the phase of tidal component of the HFSN envelope has stabilised value during several months before strong earthquake.