

УДК 534.286 + 550.347.097 + 550.348.436

## Механизм приливных эффектов в сейсмичности на основе модели амплитудно-зависимой диссипации

В.А. Салтыков

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия

Обычно при рассмотрении приливных эффектов в сейсмичности земные приливы рассматриваются как источник триггерного воздействия на сейсмичность. Предложен альтернативный механизм связи землетрясений с приливами, учитывающий приливные вариации физических свойств среды. Рассмотрена приливная модуляция потока слабых землетрясений с позиций модели амплитудно-зависимой диссипации. Обнаружены статистически значимые периодические вариации энергетических характеристик землетрясений с периодом основных приливных волн. Такие изменения могут быть вызваны изменением декремента затухания среды  $\Delta\theta = (6 \dots 10) \cdot 10^{-4}$ . Показано, что в будущих очаговых зонах сильных землетрясений вариации декремента могут увеличиваться в 3–4 раза. Это может привести к периодическому искажению энергетических оценок, что ведет к кажущемуся изменению сейсмического потока, ошибочно интерпретируемому как приливная модуляция. Оценка величины такого изменения сейсмического потока соответствует эмпирическим данным о приливной модуляции сейсмичности.

*Ключевые слова:* земные приливы, землетрясение, декремент, амплитудно-зависимая диссипация, модуляция

## Tidal effects and amplitude-dependent dissipation in seismicity

V.A. Saltykov

Kamchatka Branch of Geophysical Service RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

Tidal effects in seismicity are normally considered reasoning from the fact that Earth's tides are a source of trigger action on seismicity. In the paper, an alternative mechanism linking earthquakes with tides is proposed taking into account tidal variations in physical properties of a medium. Tidal modulation of minor earthquakes is considered in the context of amplitude-dependent dissipation. It is found that there are statistically significant periodic variations in the energy characteristics of earthquakes with a period of main tidal waves. The variations can be due to the varying damping decrement of a medium  $\Delta\theta = (6 \dots 10) \cdot 10^{-4}$ . It is shown that in focal zones of future major earthquakes, the variation in the damping decrement can increase 3–4 times. This can lead to periodically distorted energy estimates and apparent changing seismic flow which is erroneously interpreted as tidal modulation. The change of seismic flow corresponds to empirical data on tidal modulation of seismicity.

*Keywords:* Earth's tides, earthquake, decrement, amplitude-dependent dissipation, modulation

### 1. Введение

Проблема влияния земных приливов на сейсмичность всегда привлекала к себе внимание исследователей и остается популярной в настоящее время. Об этом свидетельствует большое количество публикаций (начиная с классической работы [1]) и обзоров [2, 3 и др.], посвященных этой тематике. Обычно приливы рассматриваются как источник триггерного воздействия на сейсмичность. В данной статье предлагается другой механизм связи землетрясений с приливами: как альтернатива инициированию землетрясений земными прили-

вами представлены последствия приливных вариаций физических свойств среды.

В работе [4] описан механизм негистерезисной амплитудно-зависимой диссипации упругих волн в микро-неоднородных средах, содержащих мягкие дефекты-включения, обладающие линейными диссипативными свойствами и упругой нелинейностью. Под амплитудно-зависимыми диссипациями подразумевается зависимость поглощения упругих волн от амплитуды квазистатической деформации.

Сочетание линейной диссипации с упругой нелинейностью дефектов приводит к выраженной преимущест-

венно диссипативной нелинейности среды для упругих волн. Роль мягких дефектов в формировании нелинейных свойств среды в настоящее время является общепризнанной, а горные породы рассматриваются в качестве одного из наиболее ярких примеров сред, обладающих такими микроструктурными особенностями. Поэтому предложенный в [4] механизм амплитудно-зависимой диссипации может эффективно проявляться в горных породах, где роль мягких включений играют трещины.

Для решения задачи, связанной с влиянием приливных вариаций физических свойств среды на сейсмичность, наиболее важной особенностью механизма амплитудно-зависимой диссипации является следующее: в отличие от однородных материалов, где амплитудно-зависимые вариации поглощения и упругого модуля оказываются, как правило, одного порядка, в микро неоднородном материале изменения поглощения могут многократно превышать сопутствующие вариации упругого модуля [4]. Отмечается, что дефекты дают одинаковые по порядку величины нелинейные вклады в относительное изменение упругого модуля  $E$  и в абсолютное (а не относительное!) изменение декремента  $\theta$ . Отсюда следует, что амплитудно-зависимые (в нашем случае от приливной деформации  $\epsilon$ ) относительные вариации декремента  $\Delta\theta/\theta$  оказываются многократно выше, чем вариации упругого модуля:  $\Delta\theta/\theta \gg \Delta\theta \approx \Delta E/E$ , поскольку для горных пород декремент практически всегда много меньше единицы:  $\theta \ll 1$ .

Существующие согласно модели амплитудно-зависимой диссипации [4] приливные вариации декремента затухания должны найти отражение в вариациях энергетических параметров землетрясения, и задачей становится обнаружение «приливного» изменения измеряемого энергетического класса  $K$  (или магнитуды  $M$ ) землетрясений.

## 2. «Приливные» вариации энергетических параметров землетрясений

Энергетический класс  $K_S$ , определяемый для камчатских землетрясений по шкале С.А. Федотова [5], является по определению десятичным логарифмом сейсмической энергии землетрясения, измеряемой в джоулях. Можно записать

$$K_S = \lg(A/T)_{\max}^2 + \delta(\Delta, h) = \\ = \frac{2}{\ln 10} \ln(A/T)_{\max} + \delta(\Delta, h),$$

где  $A$  — максимальная амплитуда смещения почвы;  $T$  — соответствующий период;  $\delta(\Delta, h)$  — калибровочная функция, учитывающая эпицентральное расстояние  $\Delta$  и глубину очага  $h$ .

Учитывая, что  $A$  — это амплитуда затухающей с расстоянием  $r$  сферической волны, т.е.  $A = A_0/r \times$

$\times \exp(-\theta r/\lambda)$ , где  $\theta$  — декремент затухания;  $\lambda$  — длина волны, выражение для энергетического класса:

$$K_S = -\frac{2}{\ln 10} \theta \frac{r}{\lambda} + \delta_1(\Delta, h, A_0, f, r),$$

где  $\delta_1(\Delta, h, A_0, f, r)$  — функция всех перечисленных аргументов за исключением длины волны  $\lambda$  и декремента  $\theta$ . Считая эти аргументы фиксированными, дифференциал  $K_S$  равен:

$$dK_S = \frac{2}{\ln 10} \frac{r}{\lambda} \left[ d\theta - \theta \frac{d\lambda}{\lambda} \right].$$

В соответствии с моделью амплитудно-зависимой диссипации [4], как было упомянуто выше,  $d\theta \approx dE/E$  и учитывая, что  $\lambda \sim \sqrt{E}$ ,

$$d\theta \approx \frac{dE}{E} = 2 \frac{d\lambda}{\lambda},$$

а с учетом типичного значения декремента затухания для горных пород ( $\theta \ll 1$ )

$$dK_S \approx \frac{2}{\ln 10} \frac{r}{\lambda} d\theta = \frac{2}{\ln 10} \frac{rf}{V_S} d\theta.$$

С точностью до постоянного множителя дифференциал магнитуды  $dM$  описывается аналогичной формулой. В частности, для локальной магнитуды  $M_L$ , которая связана с энергетическим классом  $K_S$  соотношением  $K_S = 2M_L + 1.5$  [6]:

$$dM \approx \frac{1}{\ln 10} \frac{r}{\lambda} d\theta = \frac{1}{\ln 10} \frac{rf}{V_S} d\theta.$$

Для обнаружения приливных вариаций в расчетных значениях энергетического класса  $K_S$ , связываемых с приливными вариациями декремента  $\theta$ , проведен вычислительный эксперимент. Как правило, для одного и того же землетрясения значения энергетического класса  $K_{S1}$ , полученное при обработке сейсмограммы на станции 1, и  $K_{S2}$  (соответственно для сейсмограммы со станции 2) не одинаковы, что может быть объяснено стохастической природой большинства геофизических оценок, направленностью излучения сейсмических волн, особенностями строения среды на сейсмических трассах. Учитывая это, рассматривается вариант расположения двух станций и очага землетрясения на одной прямой (рис. 1). При такой диспозиции предполагается, что влияние ориентации очага землетрясения сведено

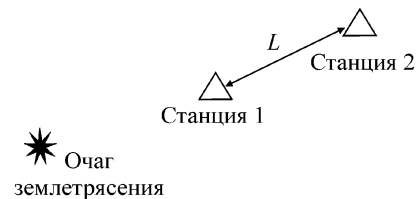


Рис. 1. Схематическое взаимное расположение регистрирующих станций и очага землетрясения в целях выявления приливных вариаций энергетических оценок землетрясения

к минимуму, а трассы прямых S-волн, приходящих на станции, будут достаточно близки на начальном участке, соответствующем отрезку «гипоцентр – станция 1», что даст одинаковое затухание сейсмических волн на начальном участке.

При такой схеме, если существуют приливные вариации декремента затухания  $\Delta\theta$ , то они могут проявиться в периодической неслучайной компоненте в разности определений энергетического класса двумя станциями:

$$\Delta K_S = K_{S2} - K_{S1}.$$

Используя достаточный (с точки зрения статистической обработки) сейсмологический материал, задача сводится к выявлению этой периодической компоненты во временном ходе  $\Delta K_S$ . К используемому набору данных (выборка из каталога землетрясений) предъявлялись следующие требования:

1. Эпицентры землетрясений и сейсмостанции должны находиться на одной прямой.

2. Землетрясения должны происходить в достаточно компактной области пространства, что обеспечивает близость сейсмических трасс «очаг – сейсмостанция».

3. Ограничение на длительность ряда снизу: рассматриваемый временной интервал должен позволить провести рассмотрение различных приливных фаз и разделение приливных волн.

4. Ограничение на длительность ряда сверху: за рассматриваемое время напряженно-деформированное состояние среды в окрестности станций и между ними не должно значительно меняться. Косвенным свидетельством этого можно считать отсутствие сильных землетрясений в рассматриваемой пространственной области.

### 3. Исходные данные

Рассмотрены различия в определении энергетического класса землетрясения  $\Delta K_S$  на двух сейсмостанциях Камчатской региональной сети Камчатского филиала Геофизической службы РАН [7]. В соответствии с вышеперечисленными требованиями для анализа были выбраны афтершоки землетрясения 21 июня 1996 г.  $M_w = 6.8$  ( $\varphi = 53.88^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 159.63^\circ\text{E}$ ,  $h = 0$  км) [8], зарегистрированные на сейсмостанциях Кроноки (KRI,  $\varphi = 54.60^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 161.13^\circ\text{E}$ ) и Шипунский (SPN,  $\varphi = 53.10^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 160.01^\circ\text{E}$ ) (рис. 2). В 1996–1997 гг. станция Кроноки представляла собой стационарную станцию регионального типа с гальванометрической регистрацией на фотобумагу, станция Шипунский обеспечивала передачу аналоговых данных по радиоканалу в приемный центр в г. Петропавловске-Камчатском. Регистрирующая аппаратура в обоих пунктах была однотипной, и методика обработки сейсмических данных в течение анализируемого временного интервала не менялась.

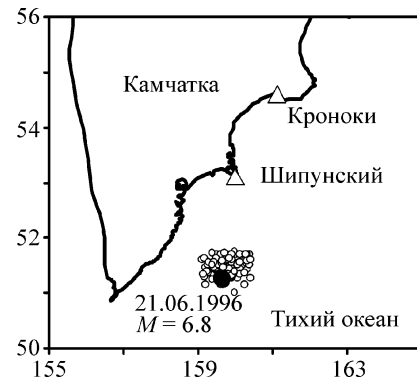


Рис. 2. Эпицентры землетрясения 21 июня 1996 г.  $M = 6.8$  (большой круг) и его афтершоков (малые круги). Треугольниками отмечены две сейсмостанции, данные которых использованы в работе

Рассмотрены 147 землетрясений в диапазоне классов  $K_S = 8.9 \dots 11.0$  ( $M_L = 3.7 \dots 4.8$ ), произошедшие с 21 июня 1996 г. по 21 июня 1997 г. Дисперсия различий в определении энергетического класса  $K_S$  на двух станциях составила 0.3.

### 4. Алгоритм выявления «приливных» вариаций

Методика определения «приливных» вариаций разности  $\Delta K_S$ , имеющих период основных приливных волн, была близка к широко распространенному алгоритму выявления скрытых периодичностей — методике наложения эпох (схема Бью-Балло [9]) и состояла в следующем:

– задав ожидаемый период  $T$  в соответствии с выбранной приливной волной, время  $i$ -го землетрясения  $t_i$  было пересчитано в безразмерный параметр  $\tau_i$ :

$$\tau_i = t_i/T - \text{int}(t_i/T),$$

где  $\text{int}(\dots)$  означает целую часть величины в скобках;

– полученный ряд  $(\tau_i, \Delta K_{Si})$  аппроксимировался синусоидой с единичным периодом методом наименьших квадратов. В данном случае нас интересует оценка амплитуды выделенной гармонической компоненты разности классов  $\Delta K_S$ .

Расчеты были проведены для периодов основных приливных волн, к которым относятся  $O_1$  (лунная главная, период  $T = 25.82$  ч),  $K_1$  (лунно-солнечная деклиналционная,  $T = 23.93$  ч),  $P_1$  (солнечная главная,  $T = 24.07$  ч),  $M_2$  (лунная главная,  $T = 12.42$  ч),  $S_2$  (солнечная главная,  $T = 12.00$  ч),  $N_2$  (лунная большая эллиптическая,  $T = 12.66$  ч) [10]. На рис. 3 представлены статистически обоснованные периодические изменения  $\Delta K_S$ . Амплитуда вариаций  $\Delta K_S$  составила  $0.15 \pm 0.06$  (период  $T = 12.4$  ч, 12.7 ч),  $0.09 \pm 0.06$  (период  $T = 25.8$  ч) и  $0.10 \pm 0.06$  (период  $T = 24.0$  ч).

Следует отметить, что неравномерное распределение афтершоков во времени привело к тому, что селек-

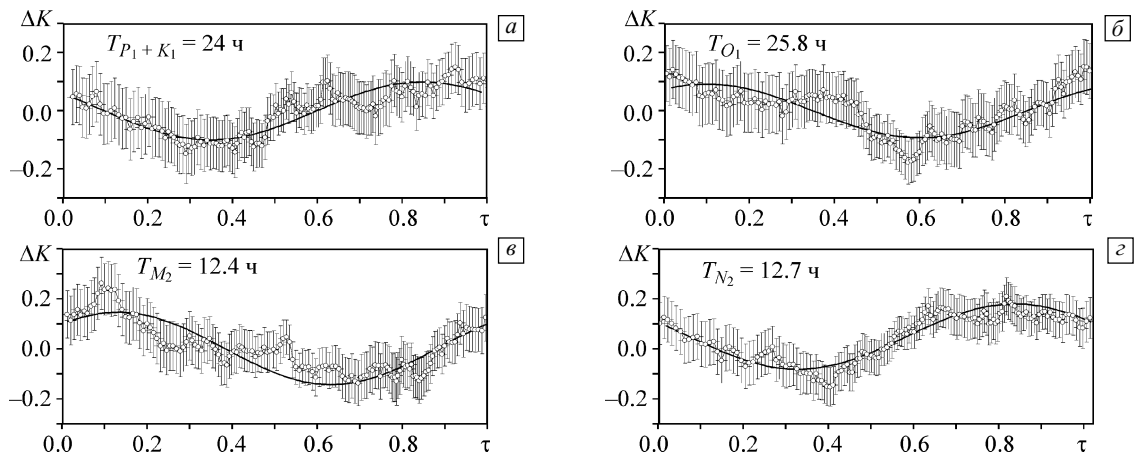


Рис. 3. Сглаженные вариации разности энергетических классов  $\Delta K_S$ , определенных по данным двух сейсмостанций, как функция безразмерного параметра  $\tau$ . Приведены результаты для периодов, соответствующих приливным волнам  $P_1 + K_1$ ,  $O_1$ ,  $M_2$  и  $N_2$  — 24.0, 25.8, 12.4 и 12.7 ч. Сплошная линия соответствует аппроксимации синусоидой

ция по частоте применяемого фильтра существенно хуже, чем при равномерном распределении для одинаковых длительностей анализируемых рядов. В частности, оказалось невозможным разделить компоненты, соответствующие приливным волнам  $P_1$  и  $K_1$  с близкими периодами 23.93 и 24.07 ч, но с волной  $O_1$  группа  $P_1 + K_1$  разделяется уверенно. Безразмерный параметр  $\tau$  равномерно распределен по интервалу  $[0, 1]$ , что позволяет использовать предлагаемую методику для оценки периодических вариаций энергетического класса  $K_S$ .

### 5. Оценка величины «приливных» вариаций декремента

Для полученной амплитуды периодических вариаций энергетического класса  $\Delta K_S \approx 0.15$  сделана оценка соответствующих вариаций декремента по формуле

$$\Delta\theta = \Delta K_S \frac{\ln 10}{2} \frac{V_S}{Lf}$$

Исходя из расстояния между станциями  $L = 180$  км, значений скорости S-волны  $V_S = 3 \dots 4$  км/с и ее частоты  $f = 4 \dots 5$  Гц, такие изменения  $\Delta K_S$  могут быть вызваны изменениями декремента затухания сейсмических волн  $\Delta\theta \approx (6 \dots 10) \cdot 10^{-4}$ .

Эта величина находится в диапазоне оценок  $\Delta\theta$  для модели приливного эффекта в сейсмической эмиссии (высокочастотных сейсмических шумах) [11], экспериментов по измерению приливных вариаций скоростей сейсмических волн с частотой 167 Гц на базе 360 м [12] ( $\Delta\theta \approx (2 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ ) и с частотой 5–8 Гц на базе ~400 км [13] ( $\Delta\theta \approx 3 \cdot 10^{-5}$ ).

Таким образом, приливные вариации именно параметров среды, в которой распространяются сейсмические волны, могут вызывать наблюдаемые вариации энер-

гетических оценок землетрясений. Здесь следует отметить, что согласно модели [11] относительные вариации декремента при заданной величине деформации  $\epsilon$  определяются фактически только свойствами дефектов (их эффективной мягкостью и нелинейностью) и не зависят от их концентрации, т.е. определяются физическими свойствами среды. Тогда можно ожидать наиболее яркого проявления эффекта «приливных» вариаций  $\theta$  в местах подготовки сильных землетрясений — в очаговых областях будущих сильных землетрясений, где по литературным данным [14–17] отмечаются повышенные значения затухания, т.е. величины  $\theta$ , а значит и  $\Delta\theta$ .

### 6. Оценка приливных вариаций декремента в зоне подготовки сильного землетрясения

В работе [18] на основе анализа коды сейсмических волн приведена оценка изменения добротности среды  $Q$  в период подготовки сильных землетрясений с магнитудой  $M \approx 8$ : уменьшение добротности оценивается как  $\approx 20\%$ . Здесь под изменением следует понимать не периодические «приливные» вариации, а изменение средних фоновых значений. Для используемого нами декремента затухания  $\theta = \pi/Q$  оценка вариаций составит те же  $\approx 20\%$ . Но эта оценка относится не к самому развивающемуся очагу сильного землетрясения, а к существенно большему объему среды, захватываемому сейсмическими волнами, формирующими коду землетрясения. Этот объем включает в себя пространственную область между очагом и сейсмической станцией с захватом прилежащего пространства, обусловленным эффектами рассеяния волн. На основе данных работы [18] можно получить оценку вариаций параметров поглощения непосредственно в очаговой зоне. Разделим интегральный эффект поглощения на две компоненты —

поглощение в очаге готовящегося сильного землетрясения с декрементом  $\theta_1$  и поглощение в остальной части среды с декрементом  $\theta_2$ :

$$e^{-\theta t} = e^{-\theta_1 t_1} e^{-\theta_2 t_2},$$

где  $t$  — полное время пробега волны от гипоцентра до сейсмостанции;  $t_1$  и  $t_2$  — время пробега по области очага готовящегося сильного землетрясения и вне него соответственно. Учитывая постоянство частоты  $f$ ,

$$t\theta = t_1\theta_1 + t_2\theta_2.$$

Предполагая, что в основном изменение поглощения захватывает очаговую область, т.е.  $\theta_2 = \theta_0$ , а  $\theta = k\theta_0$ , где  $\theta_0$  — фоновое значение декремента,  $k = 1.2$  (согласно приведенному в [18] 20%-му уменьшению добротности  $Q$ , что соответствует аналогичному увеличению декремента  $\theta$ ), получаем выражение для  $\theta_1$ :

$$\theta_1 = \theta_0[k + (k-1)t_2/t_1].$$

Для приведенных в [18] примеров сильных землетрясений, исходя из размеров очага и положения сейсмостанций, для прямых волн выполняется в среднем соотношение  $t_2/t_1 = 4$ . Однако с учетом рассеяния волн, формирующих коду землетрясения, это соотношение существенно увеличивается. Исходя из методики выделения анализируемого участка коды (время начала коды определяется как удвоенное время пробега S-волны, длительность анализируемого интервала, как правило, составляет десятки секунд) и учитывая, что однократное рассеяние произойдет за пределами очага (т.е. время  $t_1$  не изменится), соотношение  $t_2/t_1$  можно принять равным 10–15. В итоге получаем грубую оценку декремента  $\theta$  в готовящемся очаге сильного землетрясения:  $\theta_1 \approx (3..4)\theta_0$ . Предполагая постоянной относительную вариацию декремента  $\Delta\theta_1/\theta_1$  в соответствии с моделью [11], следует ожидать аналогичного увеличения приливных вариаций декремента  $\Delta\theta_1$  в очаге сильного землетрясения. Используя полученное выше значение для приливных вариаций декремента  $\Delta\theta \sim (6..10) \cdot 10^{-4}$  как фоновое  $\Delta\theta_0$ , получаем оценку ожидаемых приливных вариаций декремента в очаге:  $\Delta\theta_1 \sim (2..4) \cdot 10^{-3}$ .

Как уже отмечалось выше, приливные вариации декремента вызывают искажение определяемого энергетического класса землетрясения. Приняв значения декремента затухания  $\Delta\theta = 0.004$ , скорости S-волны  $V_S = 3$  км/с, частоты  $f = 5$  Гц, расстояния  $R = 40$  км (радиус очаговой зоны землетрясения 21 июня 1996 г. с магнитудой  $M_W = 6.8$  (рис. 2)), получаем искажение класса

$$\Delta K_S = \frac{2}{\ln 10} \frac{Rf}{V_S} \Delta\theta = 0.23.$$

### 7. Последствия «приливного» искажения энергетических оценок землетрясения

«Приливные» ошибки в определении энергетического класса приводят к тому, что «мгновенный» график

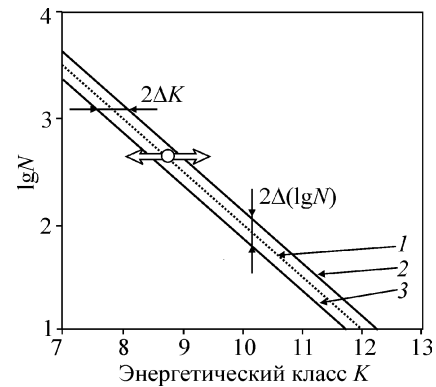


Рис. 4. Схема возникновения кажущегося приливного изменения потока землетрясений  $N$  при приливном искажении энергетического класса  $K$  на величину  $\Delta K$ : 1 — зависимость числа землетрясений  $N$  от энергетического класса  $K$  в соответствии с законом Гутенберга–Рихтера; 2 — кажущееся увеличение потока  $N$  при приливном уменьшении декремента  $\theta$  (завышении класса землетрясений на  $\Delta K$ ); 3 — кажущееся уменьшение потока  $N$  при приливном увеличении декремента  $\theta$  (занижении класса землетрясений на  $\Delta K$ )

повторяемости (рис. 4), связывающий частоту землетрясений с их энергией согласно закону Гутенберга–Рихтера, осциллирует вдоль оси абсцисс (энергетический класс или магнитуда) с периодичностью приливного процесса. Учитывая монотонный характер графика повторяемости, эти осцилляции можно перевести в вариации сейсмического потока (числа землетрясений в единицу времени).

Здесь нужно учесть важную особенность большинства методик анализа сейсмического режима. Как правило, с целью анализа однородного каталога рассматриваются землетрясения выше некоторого энергетического порога (обычно это уровень надежной регистрации землетрясений, ниже которого начинает наблюдаться отклонение распределения числа землетрясений от закона Гутенберга–Рихтера  $\lg N = a - \gamma K$ , т.е. отклонение от линейной формы графика повторяемости). Как результат «приливных» осцилляций графика повторяемости, в зависимости от знака этой поправки либо часть землетрясений с истинной энергией выше уровня надежной регистрации исключается из рассмотрения, либо наоборот — землетрясения с более низким классом попадают в число рассматриваемых (рис. 4), т.е. при таком традиционном пороговом ограничении рассматриваемых землетрясений возникает кажущийся эффект «приливных» вариаций потока землетрясений.

Оценка «приливных» вариаций потока землетрясений может быть получена исходя из приведенного выше значения  $\Delta K_S = 0.23$ . Согласно графику повторяемости  $\lg N = a - \gamma K_S$  с наклоном  $\gamma = 0.5$  (среднее значение для Камчатки), получена оценка изменения потока землетрясений  $N$  — в  $\approx 1.3$  раза в ту или иную сторону в зависимости от знака прилива.

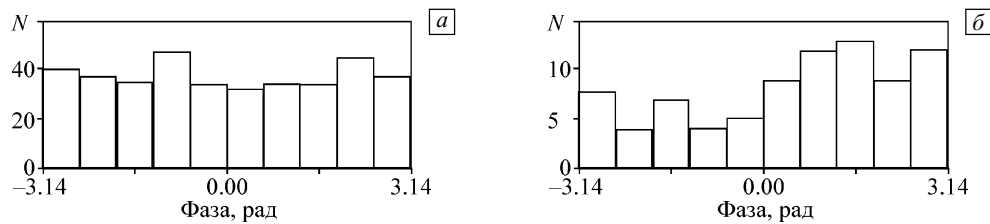


Рис. 5. Распределение числа землетрясений с  $M_L \geq 3.5$ , произошедших в 1962–1996 гг. (а) и в 1986–1996 гг. (б) в очаговой зоне землетрясения 21 июня 1996 г., по величине фазы приливной волны  $K_1$  с периодом 23.93 ч (по [21])

В работах [19–22] рассмотрено воздействие приливов на слабую сейсмичность в очаговой зоне будущего сильного землетрясения и на примере нескольких сильных камчатских землетрясений показано, что в течение нескольких лет в будущем очаге наблюдается статистическое соответствие времени возникновения слабых землетрясений фиксированным фазам некоторых приливных волн. Приведенные в [21] данные позволяют провести сопоставление с представленными выше результатами. В частности, в [21] было рассмотрено распределение слабых землетрясений по значениям фазы отдельной приливной волны, соответствующим времени возникновения этих землетрясений. Как пример, на рис. 5 для будущей очаговой зоны сильного землетрясения 21 июня 1996 г.,  $M_W = 6.8$  (рис. 2) показано распределение фоновой сейсмичности ( $M_L \geq 3.5$ ) по фазе волны  $K_1$  (период  $T = 23.9$  ч) для двух временных интервалов 35 лет (1962–1996 гг.) и 10 лет (1986–1996 гг.), предшествующих землетрясению. Если для длинного ряда наблюдений распределение является равномерным, то для более короткого ряда оно имеет ярко выраженные максимум и минимум. Статистическая значимость подтверждалась превышением параметра  $C_0$  (концентрация фазы в распределении Мизеса  $f(x) = A \exp[C_0 \cos(x - x_0)]$  [23], применяемом для угловых величин  $x$ , которыми и являются фазы приливных волн) критического значения  $C_{cr}$  по уровню значимости  $\alpha = 0.05$  в соответствии с критерием Рэлея [24].

Распределение землетрясений, приведенное на рис. 5, соответствует распределению Мизеса с параметром концентрации  $C_0 = 0.5$ . Оценка параметра концентрации в распределении Мизеса, соответствующего вариациям сейсмического потока при ошибках в определении энергетического класса в результате приливных вариаций поглощения в среде, составляет  $C_0 = 0.3$ . Учитывая оценочный характер вышеприведенных построений, соответствие этих величин можно считать удовлетворительным.

## 8. Заключение

В статье предложен альтернативный триггерному механизму связи землетрясений с приливами, учитываю-

щий приливные вариации физических свойств среды. Рассмотрена приливная модуляция потока слабых землетрясений с позиций модели амплитудно-зависимой диссипации [4]. Ранее эта модель не применялась при исследовании возмущений сейсмического потока, хотя в сейсмологии она уже использовалась для объяснения приливных эффектов, обнаруженных в сейсмической эмиссии и вариациях скоростей сейсмических волн. Согласно модели амплитудно-зависимой диссипации поглощение в микронеоднородной среде зависит от ее деформированного состояния. Следовательно, периодические приливные деформации приводят к периодическим вариациям декремента затухания  $\theta$  в горных породах, которые являются типичной микронеоднородной средой. В свою очередь, меняющееся поглощение на трассе сейсмических волн между гипоцентром землетрясения и сейсмостанцией меняет оценку магнитуды (энергетического класса) землетрясения. Предложенный в работе подход, использующий линейное взаиморасположение сейсмостанций и землетрясений, позволил обнаружить статистически значимые периодические вариации энергетических характеристик землетрясений с периодом основных приливных волн. Выявленные в представленной работе периодические вариации энергетического класса  $\Delta K_S \approx 0.15$  могут быть вызваны приливными вариациями декремента  $\Delta\theta = (6 \dots 10) \times 10^{-4}$ , что согласуется с опубликованными ранее результатами [11].

Сделаны оценки возможных периодических поправок к энергетическим параметрам землетрясений, произошедших в очаговых зонах сильных землетрясений, где, согласно работам [14–17], поглощение увеличивается. Приливные вариации декремента в очаговых зонах в данной работе оцениваются как  $\Delta\theta \sim (2 \dots 4) \cdot 10^{-3}$ . При таких изменениях поглощения вариации энергетического класса землетрясений достигают  $\Delta K_S = 0.23$ . С учетом закона Гутенберга–Рихтера отсюда следует вывод о том, что такие периодические изменения  $\Delta K_S$  приводят к периодическим вариациям сейсмического потока в 1.3 раза, причем последний эффект является «кажущимся» и связан с нюансами выборки анализируемых землетрясений, в частности с ее нижним энергетическим порогом.

Основными результатами работы являются следующие:

1. Модель амплитудно-зависимой диссипации позволяет объяснить отдельные проявления приливного воздействия на свойства среды, отображенные в потоке землетрясений. Полученные оценки находятся в соответствии с эмпирическими результатами.

2. Обнаружен новый эффект внесения искажений в определение энергетической оценки (энергетический класс, магнитуда) землетрясений, объясняемый приливными вариациями декремента затухания сейсмических волн, что позволяет рассматривать выявленную ранее приливную модуляцию землетрясений как вторичный эффект приливной модуляции поглощения в среде.

Полученные результаты демонстрируют возможность искусственного появления приливных эффектов в сейсмичности. При этом принципиальная возможность прямого триггерного эффекта в возникновении «приливных» землетрясений не исключается.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00521).

## Литература

- Schuster A. On lunar and solar periodicities of earthquakes // Proc. R. Soc. Lond. – 1897. – V. 61. – P. 455–465.
- Emter D. Tidal Triggering of Earthquakes and Volcanic Events // Tidal Phenomena. Lecture Notes in Earth Sciences. V. 66. – Berlin: Springer, 1997. – P. 293–309.
- Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. – М.: ОИФЗ РАН, 1996. – 188 с.  
Avsyuk Yu.N. Tidal Forces and Natural Processes. – Moscow: JIPE RAS, 1996. – 188 p.
- Зайцев В.Ю., Матвеев Л.А. Амплитудно-зависимая диссипация в микро неоднородных средах с линейным поглощением и упругой нелинейностью // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 5. – С. 695–710.  
Zaitsev V.Yu., Matveev L.A. Strain-amplitude dependent dissipation in linearly dissipative and nonlinear elastic microinhomogeneous media // Geolog. Geofiz. – 2006. – V. 47. – No. 5. – P. 695–710.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 116 с.  
Fedotov S.A. Energy Classification of the Kuril-Kamchatka Earthquakes and the Problem of Magnitudes. – Moscow: Nauka, 1972. – 116 p.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами — среднмировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 6. – С. 55–63.  
Gusev A.A., Melnikova V.N. Relationships between magnitude scales for global and kamchatkan earthquakes // Volc. Seism. – 1992. – V. 12. – P. 723–733.
- Старовойт О.Е., Мишаткин В.Н. Сейсмические станции Российской академии наук. – Москва–Обнинск: ГС РАН, 2001. – 88 с.  
Starovoi O.E., Mishatkin V.N. Seismic Stations of the Russian Academy of Sciences. – Moscow–Obninsk: GS RAS, 2001. – 88 p.
- Левина В.И., Иванова Е.И., Гусев А.А. Рой землетрясений на Камчатке с основным событием 21 июня 1996 года ( $M_w = 6.8$ ) // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. – М.: ГС РАН, 2002. – С. 138–143.  
Levina V.I., Ivanova E.I., Gusev A.A. Kamchatkan Earthquake Swarm with the Main Event on June 21, 1996 ( $M_w = 6.8$ ), Earthquakes in the Northern Eurasia in 1996. – Moscow: GS RAS, 2002. – P. 138–143.
- Серебренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. – М.: Наука, 1965. – 244 с.  
Serebrennikov M.G., Pervozvanskii A.A. Detection of Hidden Periodicity. – Moscow: Nauka, 1965. – 244 p.
- Мельхиор П. Земные приливы. – М.: Мир, 1968. – 483 с.  
Melchior P. The Tides of the Planet Earth. – Oxford: Pergamon Press, 1993.
- Зайцев В.Ю., Салтыков В.А., Матвеев Л.А. О связи приливной модуляции сейсмических шумов с амплитудно-зависимыми потерями в горных породах // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54. – С. 621–628.  
Zaitsev V.Yu., Saltykov V.A., Matveev L.A. Relation between the tidal modulation of seismic noise and the amplitude-dependent loss in rock // Acoustical Physics. – 2008. – V. 54. – No. 4. – P. 538–544.
- Боголюбов Б.Н., Лобанов В.Н., Назаров В.Е., Рылов В.И., Стромков А.А., Таланов В.И. Амплитудно-фазовая модуляция сейсмоакустической волны под действием лунно-солнечного прилива // Геология и геофизика. – 2004. – № 8. – С. 1045–1049.  
Bogolyubov B.N., Lobanov V.N., Nazarov V.E., Rylov V.I., Stromkov A.A., Talanov V.I. Phase-amplitude modulation of a seismic acoustic wave under diurnal tides // Russ. Geol. Geophys. – 2004. – V. 45. – No. 8. – P. 1045–1049.
- Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Вибросейсмический мониторинг сейсмоопасных зон // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 6. – С. 60–64.  
Glinskii B.M., Kovalevskii V.V., Khairtdinov M.S. Vibroseismic monitoring of earthquake-prone areas // J. Volcan. Seism. – 2000. – V. 21. – No. 6. – P. 723–730.
- Гусев А.А., Лемзиков В.К. Предварительные результаты изучения вариаций огибающих коды близких землетрясений перед Усть-Камчатским землетрясением 1971 г. // Вулканология и сейсмология. – 1980. – № 6. – С. 82–93.  
Gusev A.A., Lemzikov V.K. Preliminary results of study of variations skirting the short-period codas of the nearest earthquakes before the Ust'-Kamchatsk earthquake of 1971 // Vulkan. Seismol. – 1980. – No. 6. – P. 82–93.
- Гусев А.А., Лемзиков В.К. Аномалии характеристик кода-волн слабых землетрясений перед тремя сильными землетрясениями Курило-Камчатской зоны // Вулканология и сейсмология. – 1984. – № 4. – С. 76–90.  
Gusev A.A., Lemzikov V.K. Anomalies of coda wave characteristics of small earthquake before the three strong earthquakes of the Kuril-Kamchatka zone // Vulkan. Seismol. – 1984. – No. 4. – P. 76–90.
- Jin A., Aki K. Temporal change in coda Q before the Tangshan Earthquake of 1976 and the Haicheng Earthquake of 1975 // J. Geophys. Res. B1. – 1986. – V. 91. – P. 665–673.
- Jin A., Aki K. Case 7A: Observational and Physical Bases for the Coda  $Q^{-1}$  Precursor // Evaluation of Proposed Earthquake Precursors. – Washington D.C.: AGU, 1991. – P. 33–46.
- Gusev A., Lemzikov V. Properties of scattered elastic waves in the lithosphere of Kamchatka: parameters and temporal variations // Tectonophysics. – 1985. – V. 112. – P. 137–153.
- Салтыков В.А. О воздействии земных приливов на сейсмические процессы // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока / Под ред. А.В. Викулина. – Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. – С. 12–21.  
Saltykov V.A. On the Effect of Earth Tides on Seismic Processes // Seismicity Problems of the Far East / Ed. by A.V. Vikulin. – Petropavlovsk-Kamchatsky: KEMSD GS RAS, 2000. – P. 12–21.
- Тюпкин Ю.С. Модулирование слабой сейсмичности приливными деформациями перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. – 2002. – № 3. – С. 3–10.

- Turpin Yu.S.* Modulation of weak seismicity by tidal deformations before strong earthquakes // *Vulkan. Seismol.* – 2002. – No. 3. – P. 3–10.
21. *Салтыков В.А., Иванов В.В.* Вариации статистических параметров сейсмичности, связываемых с земными приливами // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* – 2003. – № 1. – С. 130–134.  
*Saltykov V.A., Ivanov V.V.* Variations of Seismicity Parameters Connected with Earth Tides // *Petropavlovsk-Kamchatsky: Bulletin KRAESC. Earth Sciences.* – 2003. – No. 1. – P. 130–134.
22. *Салтыков В.А., Иванов В.В., Кугаенко Ю.А.* Воздействие земных приливов на сейсмичность перед землетрясением 13 ноября 1993 года  $M_W = 7.0$  (Камчатка) // *Физика Земли.* – 2004. – № 7. – С. 25–34.  
*Saltykov V.A., Ivanov V.V., Kugaenko Yu.A.* The seismicity effect of Earth tides before the November 13, 1993, Kamchatka ( $M_W = 7.0$ ) earthquake // *Izv. Phys. Sol. Earth.* – 2004. – V. 40. – No. 7. – P. 563–572.
23. *Мардиа К.* Статистический анализ угловых наблюдений. – М.: Наука, 1978. – 240 с.  
*Mardia K.* Statistical Analysis of Angular Observations. – Moscow: Nauka, 1978. – 240 p.
24. *Чини Р.Ф.* Статистические методы в геологии. – М.: Мир, 1986. – 186 с.  
*Cheaney R.F.* Statistical Methods in Geology. – London: Allen & Unwin, 1983.

Поступила в редакцию  
14.05.2014 г.