

РАЗВИТИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ЗОН ДИЛАТАНСИИ КАК ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА АНОМАЛИЙ В ПАРАМЕТРАХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

В.А. Салтыков, Ю.А. Кугаенко

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, б-р Пуйна 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: salt@emsd.ru*

Поступила в редакцию 12 октября 2010 г.

На основе математического моделирования проведена оценка протяженности дилатансионных зон, развивающихся вблизи свободной поверхности в процессе подготовки землетрясений. Разработан и применен для численного моделирования алгоритм расчета зон дилатансии. Приведены расчетные примеры развития приповерхностных зон дилатансии перед камчатскими землетрясениями с магнитудами $M = 6.7-7.8$. Результаты численных экспериментов в рамках принятых допущений решают проблему дальнего действия готовящегося очага землетрясения на удаленную ограниченную область сбора микросейсмической информации: модель допускает развитие приповерхностных зон дилатансии в окрестностях регистрирующей сейсмической шум станции, что и может привести к возникновению предвестниковых аномалий.

Ключевые слова: сейсмическая эмиссия, сейсмический шум, очаг землетрясения, дилатансия, Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Концентрация напряжений, предшествующих возникновению сильного землетрясения, вносит свой вклад в изменение свойств среды в объеме очага и прилежащих к нему обширных приповерхностных областях [1]. При этом происходят крупные реологические изменения в среде и формируются аномальные зоны геофизических полей разной природы. По [1], наиболее универсальным механизмом развития изменений в среде является раскрытие трещин в зонах повышенных значений сдвиговых и растягивающих напряжений. Начальную стадию раскрытия трещин и последующее состояние среды, при котором развиваются процессы разрушения, большинство сейсмологов связывают с состоянием дилатансии среды, описанным в [16, 35]. Под дилатансией (“в узком смысле слова” [16]) будем здесь понимать нелинейное разуплотнение среды за счет образования трещин сдвига вследствие превышения наибольших касательных напряжений некоторого порога. Влияние процессов раскрытия микротрещин могут испытывать такие геофизические параметры, как газовая и флюидная проницаемость областей земной

коры, уровень подземных вод, электрическое сопротивление, интенсивность газовых потоков и сейсмической эмиссии и др.

Под сейсмической эмиссией понимается составная часть регистрируемого на поверхности Земли фонового микросейсмического излучения, имеющая глубинное (эндогенное) происхождение (амплитуда $10^{-9}-10^{-12}$ м, частотный диапазон – первые десятки Гц). Согласно концепции активной геофизической среды [15, 25], сейсмическая эмиссия рассматривается как интегральный отклик на все одновременно воздействующие на регион деформационные процессы.

В данной работе, применяя математическое моделирование, мы делаем оценку возможной протяженности дилатансионных зон, развивающихся вблизи свободной поверхности в процессе подготовки землетрясений.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

С конца 80-х годов на Камчатке ведутся исследования высокочастотных сейсмических шумов (ВСШ) в рамках фундаментальной проблемы сейс-

мологии, связанной с изучением возможности контроля напряженного состояния среды и подготовки сильных землетрясений по изменению параметров геофизических полей, к которым следует отнести и поле ВСШ. Возможность использования сейсмических шумов для мониторинга напряженно-деформированного состояния среды и прогноза землетрясений основывается на присутствии в их составе сейсмической эмиссии, т.е. информативных эндогенных компонент.

Основной целью этих работ является изучение характеристик ВСШ, его подверженности внешним воздействиям и установление связи ВСШ с длиннопериодными деформационными процессами, в том числе с земными приливами [23].

В основе исследований лежат специально организованные долговременные наблюдения [29], которые ведутся в пунктах, достаточно удаленных от районов индустриальной и транспортной активности. В настоящее время непрерывная регистрация ВСШ ведется в четырех пунктах в пределах Курило-Камчатской островной дуги (рис.1а): “Начики” и “Карымшина” (южная часть п-ва Камчатка, с 1992 г. и 2001 г., соответственно), “Шикотан” (Малая Курильская гряда, с 2005 г.), “Эримо” (о.Хоккайдо, мыс Эримо, с 1995 г.) [9, 28, 29, 33].

В качестве датчика сигналов ВСШ применяется резонансный узкополосный вертикальный пьезокерамический сейсмометр (чувствительность с учетом предварительного усиления – не хуже 10^9 В/м; частота собственных колебаний – 30 Гц; добротность – 100) [22, 33].

В течение последних 20 лет получены непрерывные ряды данных ВСШ, не имеющие аналогов в мировой сейсмологической практике. Анализ этих данных выявил ряд особенностей, которые свидетельствуют о модуляции ВСШ приливами и связи ВСШ с различными геофизическими процессами, в том числе с изменением напряженного состояния среды в процессе подготовки землетрясений [9, 24, 26–33]. Эти работы носят не только фундаментальный, но и прикладной характер, что связано с актуальностью проблемы сейсмического прогноза.

Обнаружено важное свойство отклика ВСШ на приливное воздействие: эффект не является стабильным во времени (рис.1б). В 90-х годах по результатам исследований ВСШ на Камчатке выдвинута гипотеза о связи вариаций фазы приливной компоненты ВСШ с геодинамическими процессами в регионе [26, 27]. В частности, выявлена синхронизация выделенной из ВСШ приливной компоненты с волной гравитационного приливного потенциала. Синхро-

низация (согласованное изменение некоторых количественных характеристик систем) — свойство материальных объектов различной природы вырабатывать единый ритм совместного движения, несмотря на подчас весьма слабые взаимные связи [19]. В нашем случае в качестве внешнего возбуждающего поля выступает земной прилив – процесс с хорошо изученными и прогнозируемыми характеристиками. В качестве ведомой системы рассматриваются ансамбли микросейсмических излучателей. Предполагается, что наиболее интенсивно реагируют на внешнее воздействие области среды, находящиеся в метастабильном состоянии. Такими областями могут быть очаги готовящегося землетрясения и обширные приповерхностные зоны микротрещиноватости и дилатансии [29]. Отметим, что достоверность этого предположения подтверждена экспериментально в ходе лабораторного моделирования [31].

На основе многолетних натуральных наблюдений нами показано [26–33], что приливная чувствительность ВСШ наиболее стабильна и статистически значима в период подготовки сильных локальных землетрясений. Эффект проявляется как стабилизация фазового сдвига $\Delta\varphi$ между приливной компонентой ВСШ и приливной волной на определенном уровне (примеры – на рис. 1 б–е).

Обнаруженный эффект синхронизации процессов лег в основу метода контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений по изменению характера отклика ВСШ на приливное воздействие [17, 31, 32]. Оригинальным в данной методике является использование земных приливов, обусловленных лунно-солнечным гравитационным воздействием, в качестве калибровочного (эталонного) сигнала с известными характеристиками при изучении закономерностей микросейсмического излучения. В качестве опорной выбрана волна O_1 , так как на Камчатке она имеет наибольшую помехозащищенность и относительно большую амплитуду. Минимальное значение магнитуды M возможного землетрясения связывается с его эпицентральным расстоянием от точки наблюдения эмпирической зависимостью $M \geq 4.0 + 0.008 \times \Delta$ при $\Delta < 400$ км. Диапазон прогнозируемых событий ограничен по глубине 250 км. Методика используется для комплексной оценки сейсмической опасности для Камчатки [32].

Эффект стабилизации $\Delta\varphi$ был обнаружен как ретроспективно, так и в режиме реального времени для 32 землетрясений 1992–2008 гг. в диапазоне магнитуд M_w от 5.0 до 7.8 для эпицентральных расстояний до 400 км. Из них 22 события имели $M \geq 6.0$.

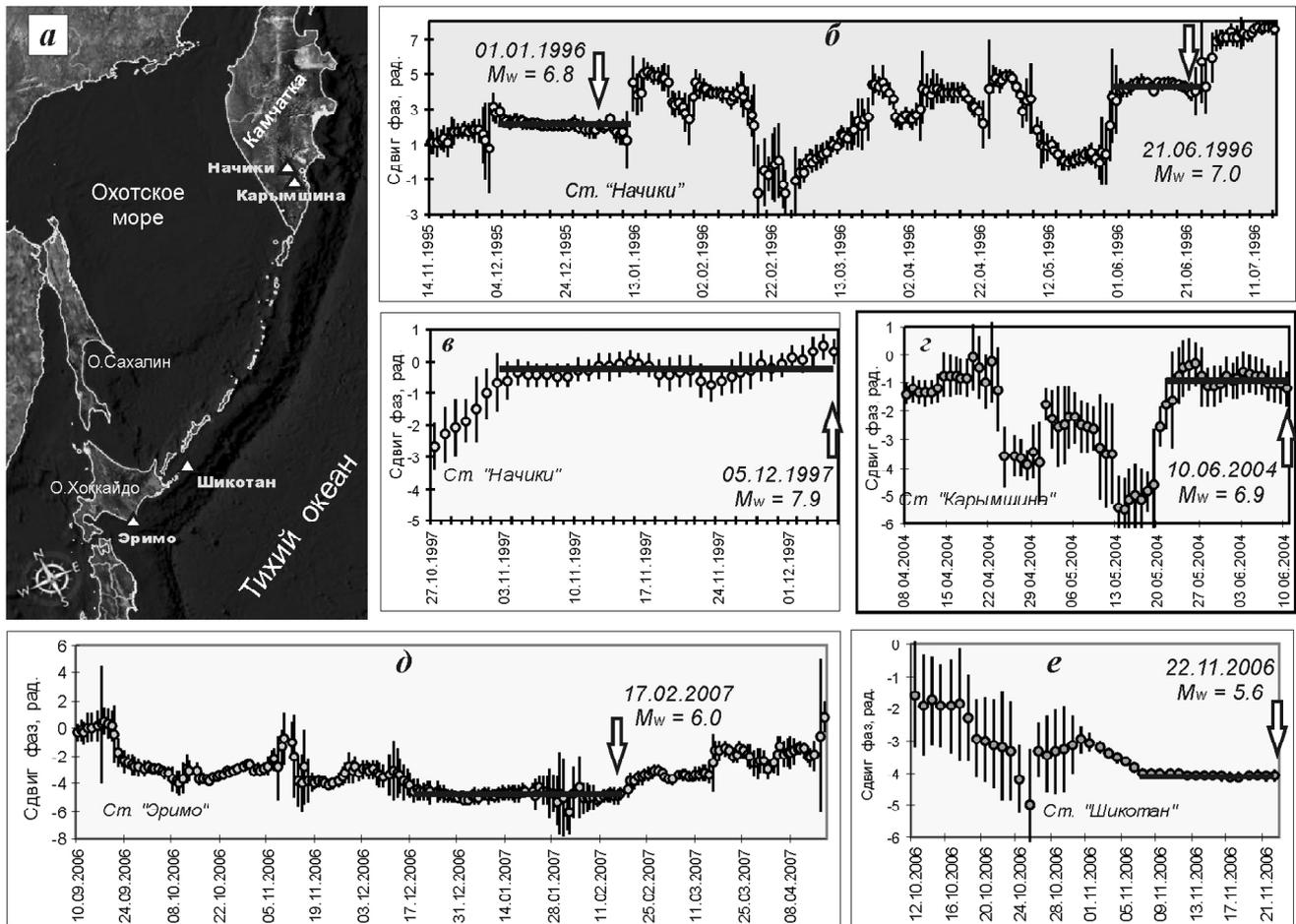


Рис. 1. Аномалии сейсмической эмиссии перед сильными землетрясениями на специализированных станциях регистрации ВСШ.

a – станции регистрации сейсмических шумов (треугольники); *б* – *е* – временной ход фазового сдвига $\Delta\varphi$ приливных компонент для волны O_1 и амплитуды приливной гармоник (в условных единицах). Примеры синхронизации перед сильными землетрясениями. Момент землетрясения отмечен стрелкой. Стабилизация параметра выделена горизонтальной линией.

Лишь перед единственным землетрясением энергетического диапазона $M \geq 6.0$ (08.03.1999, $M_w = 6.9$) предвестник выделить не удалось. В 2001–2008 гг., когда на Камчатке работали уже две станции ВСШ, в ряде случаев отмечено появление предвестников перед землетрясениями на обеих станциях одновременно.

Результаты ретроспективного выявления предвестника в других сейсмоактивных районах, где также ведутся наблюдения за ВСШ (о. Хоккайдо [28], о. Шикотан [9]), согласуются с полученными на Камчатке, хотя и имеют ряд особенностей. Следовательно, синхронизацию приливной гармоник ВСШ с соответствующей волной приливного потенциала можно рассматривать как универсальное свойство геофизической среды, связанное с ее напряженно-деформированным состоянием и про-

являющееся, в частности, перед сильными региональными землетрясениями.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является решение проблемы дальнего действия формирующегося очага сильного землетрясения. Радиус сбора микросейсмической информации станцией ВСШ на частоте 30 Гц оценивается в 8 км [13]. Камчатские станции регистрации ВСШ удалены от сейсмофокальной зоны более чем на 100 км. Следовательно, эффект синхронизации ВСШ с приливами не относится непосредственно к очаговым зонам готовящихся сильных землетрясений, а связан с изменением состояния среды в небольших областях, прилежащих к регистрирующей станции и имеющих линейные размеры до нескольких километров. Природа такого значительного

дальнодействия при появлении предвестников на расстояниях в несколько сотен километров от очага землетрясения – вопрос дискуссионный и все еще не решенный до конца. Для решения проблемы изменения тензочувствительности ВСШ в период подготовки сильных землетрясений на большом расстоянии от их очагов мы привлекаем гипотезу [1], в которой рассматриваются процессы формирования протяженных (с линейными размерами до нескольких сотен километров) приповерхностных зон дилатансии и микротрещиноватости.

В работе [1] впервые был показан сложный характер формирования зон дилатансии в упругом однородном полупространстве при отсутствии напряжений на свободной поверхности. В расчетах в качестве источника тектонических напряжений была применена единичная сосредоточенная сила. Интересным фактом оказалось образование двух зон дилатансии: очаговой в окрестности точечного силового источника и пограничной в слое около свободной поверхности. Здесь поле напряжений может содержать сильный вклад касательных напряжений и давления в связи с близостью границы, свободной от внешних напряжений. Результаты численного моделирования продемонстрировали возможность образования достаточно протяженных приповерхностных зон дилатансии с линейными размерами до нескольких сотен километров и сложной формой проекции на дневную поверхность. Отмечено, что поверхностные зоны дилатансии ведут себя достаточно изменчиво в зависимости от параметров модели. Предполагается, что при действии нескольких разнесенных в пространстве источников переменной во времени интенсивности картина перемещения дилатансных зон по поверхности может быть достаточно сложной. Расчеты областей дилатансии для широкого набора реалистичных вариантов строения среды и условий нагружения при использовании альтернативных критериев разрушения материала под действием растяжения и скалывающих нагрузок показывают согласованность результатов. Это позволяет предположить, что приповерхностная зона дилатансии может существовать в реальных природных условиях, характеризующихся сложностью, мозаичностью, контрастностью свойств. Энергетической средой, в которой осуществляется связь очаговой и приповерхностной зон дилатансии, является единое поле напряжений, создаваемое силами в источнике готовящегося землетрясения.

Идеология работы [1] взята нами за основу представляемого исследования.

Ниже представлены примеры, которые на основе математического моделирования показывают, что для камчатских землетрясений 1992–2008 гг., перед которыми наблюдалась *синхронизация* ВСШ и приливов, возможно развитие приповерхностных зон дилатансии в точке ведения регистрации ВСШ (т.е. на значительном расстоянии от инструментального эпицентра).

БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В основу численных экспериментов, выполненных в ходе наших исследований, заложены следующие представления:

- модель литосферы рассматривается как однородное изотропное упругое полупространство;
- в качестве модели очага землетрясения взят протяженный источник: дислокация (прямоугольник с постоянным вектором подвижки);
- расчет напряжений в конкретной точке полупространства через параметры дислокационного источника и характеристики среды ведется по формулам работы [38].

Задание параметров очага

Параметры очага (координаты центроида, сейсмический момент, параметры плоскостей разрыва) задаются в соответствии с каталогом механизмов очагов землетрясений (СМТ Catalog, <http://www.globalcmt.org>). Положение центра площадки очага (дислокации) совмещается с центроидом.

Размеры очага определяются по значению скалярного сейсмического момента M_0 на основе корреляционных формул из работы [4].

Для длины L и ширины W дислокации имеем:

$$\lg(L) = 0.5 \cdot M_w - 1.85, \quad \lg(W) = 0.5 \cdot M_w - 2.25,$$

где $M_w = 2/3 \cdot \lg(M_0) - 10.7$ – моментная магнитуда.

Величина подвижки $U = M_0 / (\mu \cdot S)$, где μ – модуль сдвига, S – площадь дислокации.

Компоненты подвижки по простиранию и падению определяются по ее величине U с учетом уклона (slip), значение которого приведено в каталоге СМТ.

В расчетах используется понятие сейсмического КПД. Суммарная энергия очага, определяющая напряженно-деформированное состояние в исследуемой области, вычисляется из сейсмической энергии с учетом повышающих коэффициентов [8, 20, 36, 37 и др.].

Задание параметров среды

Свойства среды приняты одинаковыми во всей расчетной области (упругое полупространство) и соответствуют крепким горным породам. Задаются: ρ – плотность породы ($\rho = 3.0 \text{ г/см}^3$), α – коэффициент

внутреннего трения ($\alpha = 0.5$), Y – сцепление породы ($Y = 5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$), μ – модуль сдвига, λ – параметр Ламэ ($\lambda = \mu = 3.675 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$).

Задание фоновых региональных напряжений

В результате взаимодействия региональных и локальных тектонических сил в сейсмоактивных зонах могут возникать области высокой концентрации тектонических напряжений. В сейсмоактивных зонах большие объемы среды находятся в аномально высоком напряженном состоянии, которое реализуется через сейсмическую активность. В рассматриваемом регионе фоновые тектонические напряжения определяются процессом субдукции: поддвигом Тихоокеанской литосферной плиты под Камчатку.

Фоновое напряженно-деформированное состояние среды может быть оценено через модель развивающегося гипотетического очага сильнейшего землетрясения, оказывающего воздействие на регион в целом. В нашем случае мы предполагаем, что на региональном уровне накопившиеся за сейсмический цикл деформации могли быть сняты сильнейшими землетрясениями 1923 г., $M_w = 8.5$ –8.8 и 1952 г., $M_w = 9.0$ [5, 6].

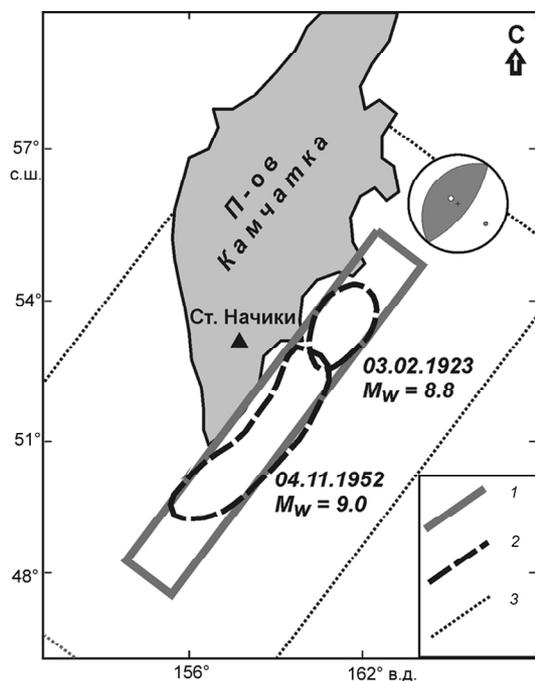


Рис. 2. Задание очага модельного сильнейшего землетрясения.

1 – граница проекции очага модельного сильнейшего землетрясения на земную поверхность; 2 – границы проекций очагов землетрясений 1923 и 1952 гг. на земную поверхность по [6]; 3 – граница области сканирования.

Очаг модельного сильнейшего землетрясения, определяющего фоновое напряженно-деформируемое состояние среды в регионе, строится как протяженная дислокация, включающая области очагов 1923 и 1952 гг. по [6] (рис. 2). Предполагается, что стадия развития модельного очага составляет в настоящее время 1/3 сейсмического цикла для сильнейших региональных землетрясений, а созданная им деформация – 1/3 от накапливающейся к концу сейсмического цикла [40]. Считаем, что для Камчатки сейсмический цикл для аналогичных сильнейших землетрясений равен приблизительно 200 лет. Энергия модельного землетрясения может быть оценена из расчетной величины подвижки для реальных сильнейших сейсмических событий. Например, для Камчатского землетрясения 1952 г. подвижка составила около 10 м [39].

Расчет зон дилатансии (по [1, 2, 7])

К области дилатансии отнесем множество точек упругой среды, для которых при заданном поле напряжений $\{s_{ij}\}$ выполнено условие:

$$D_{\tau} \equiv \tau - \alpha \times (P + \rho g z) - Y \geq 0,$$

где ρ – плотность породы; g – ускорение свободного падения, z – глубина; P – гидродинамическое давление $P = -1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$, α – коэффициент внутреннего трения, Y – сцепление породы; τ – интенсивность касательных напряжений.

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6 \cdot (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)]^{1/2}}$$

Это условие совпадает с критерием Шлейхера-Надаи разрушения материала под действием скальвающих нагрузок и удовлетворительно описывает процесс предразрушения горных пород (при нагрузке 60–90 % от критической) для качественного описания формы области активизации раскрытия трещин.

Внутри области $D_{\tau} > 0$ касательные напряжения доминируют над сжимающими. Сопротивление среды за счет сцепления здесь преодолено скальвающими усилиями, и сложились условия, благоприятные для роста числа трещин. Решение относится лишь к определению границы перехода упругого состояния в состояние нелинейного разуплотнения с образованием системы трещин. Сами механизмы их раскрытия и реологические изменения среды в зоне $D_{\tau} > 0$ используемыми решениями не описываются и в данной работе не рассматриваются.

При расчете зон дилатансии D_{τ} поле напряжений определяется как суперпозиция фона и влияния очага рассматриваемого землетрясения.

Дополнительно вычислялась вариация дилатансии δD как разность между D_{τ} и значением дилатансии D_f . D_f – это дилатансия, определяемая модельным сильнейшим землетрясением (задающим фоновое напряженно-деформируемое состояние среды во всем регионе), без учета рассматриваемого сейсмического события. Именно вариация дилатансии D демонстрирует протяженность зон влияния очага формирующегося землетрясения на реологические свойства среды.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Алгоритм расчета D_{τ} и δD реализован в виде гибкой вычислительной программы с удобным интерфейсом и содержательной визуализацией результатов. Программа позволяет:

- задавать характеристики среды и параметры модельного сильнейшего землетрясения при расчете фоновых напряжений,
- производить расчет зон дилатансии для очагов конкретных землетрясений,
- оперативно визуализировать полученные результаты в виде заданных горизонтальных и вертикальных сечений области сканирования,
- выводить запрашиваемые результаты расчетов для более детальной их визуализации в других графических пакетах.

Сканирование ведется в заданной прямоугольной области (с заданным шагом) до глубины очага землетрясения (с заданным шагом).

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ЗОН РАЗВИТИЯ ДИЛАТАНСИИ

Камчатское землетрясение 21.06.1996, $M_w = 6.8$

В Тихом океане на западном склоне глубоководной впадины к юго-востоку от Авачинского залива событием 21 июня 13 час. 57 мин. $M_w = 6.8$ начался мощный сейсмический рой, продолжавшийся до середины августа 1996 г. [10]. Рассматриваемое землетрясение является основным событием роя. Оно ощущалось на побережье полуострова с интенсивностью I до 7 баллов по шкале MSK-64 и имеет дислокацию в очаге типа взбросо-сдвиг по субвертикальной плоскости, ориентированной на северо-северо-восток.

Стабилизация фазы приливной компоненты ВСШ перед землетрясением 21.06.1996 длилась около 23 суток (рис. 1). Прогноз землетрясения был дан за трое суток до события и оправдался по всем параметрам [32].

Результаты расчета зон D_{τ} и δD приведены на рис. 3. Станция “Начики” попадает как в зону по-

ложительных значений D_{τ} , так и положительных значений δD . Обращает на себя внимание то, что в данном случае область $\delta D > 0$ образует на поверхности две несвязанные между собой зоны неправильной формы.

Кроноцкое землетрясение 05.12.1997, $M_w = 7.8$

5 декабря 1997 г. в 11 час. 26 мин. у Тихоокеанского побережья Камчатки вблизи Кроноцкого полуострова произошло самое сильное в этом районе за время детальных сейсмологических наблюдений (1961–2010 гг.) землетрясение с $M_w = 7.8$ [11]. На побережье Камчатки оно ощущалось с интенсивностью I до 7 баллов по шкале MSK-64. Механизм очага имеет взбросо-сдвиговый характер, плоскость разрыва расположена вдоль сейсмофокальной зоны, почти вертикальна и имеет северо-восточное простирание.

Кроноцкое землетрясение предварялось стабилизацией фазы приливной компоненты ВСШ в пункте регистрации “Начики” (рис. 1в). Длительность участка стабилизации перед сейсмическим событием составила около 32 суток. За 9 суток до землетрясения было составлено прогностическое заключение о возможности его возникновения [32]. Кроноцкое землетрясение также предварялось аномальными вариациями режима подземных вод. Эти предвестники наблюдались на расстоянии около 250–300 км от очаговой области землетрясения.

На рис. 4 представлены результаты расчета для приповерхностной зоны дилатансии D_{τ} и вариации дилатансии δD , которые в рамках рассматриваемой модели могли появиться перед Кроноцким землетрясением. Зоны обширны и имеют сложный характер. Станция регистрации ВСШ “Начики” попадает в область, где $D_{\tau} > 0$ и $\delta D > 0$.

Пара верхнемантийных Тумрокских землетрясений 16.06.2003, $M_w = 6.9$ и 10.06.2004 $M_w = 6.8$

В июне 2003 и 2004 гг. под территорией Камчатки внутри Тихоокеанской плиты произошло два глубоких землетрясения: 16 июня 2003 г. в 22 час 08 мин, $M_w = 6.9$, на глубине $h = 190$ км (эпицентр располагался в северо-западной части Восточного хребта в отрогах хр. Тумрок) и 10 июня 2004 г. в 15 час 19 мин, $M_w = 6.8$, на глубине $h = 208$ км (с эпицентром на юго-западном склоне Толбачинского вулкана, в 45 км к северу от первого события) [12]. Они ощущались на территории Камчатки с интенсивностью I до 5–6 баллов.

Схожесть рассматриваемых землетрясений не ограничивается близкими значениями их гипоцентров [12, 30]. Механизмы очагов землетрясений

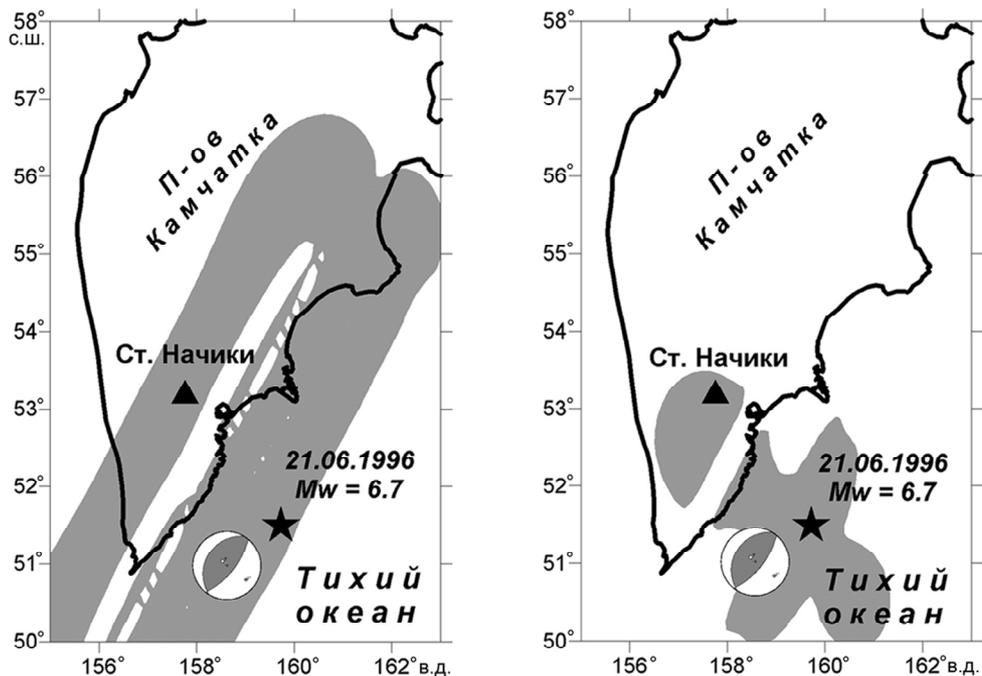


Рис. 3. Результаты моделирования приповерхностной зоны дилатансии D_t (слева) и вариации дилатансии δD (справа) для землетрясения 21.06.1996, $M_w = 6.7$.

Показаны горизонтальные сечения сканируемого объема для глубины $z = 0$. Серой заливкой выделены области, в которых рассматриваемые параметры принимают положительные значения, что по [1, 2] соответствует переходу среды из упругого состояния в состояние нелинейного разуплотнения с образованием системы трещин. Звездочкой обозначен эпицентр землетрясения. Приведен механизм очага по CMT Catalog. Треугольник – станция регистрации ВСШ.

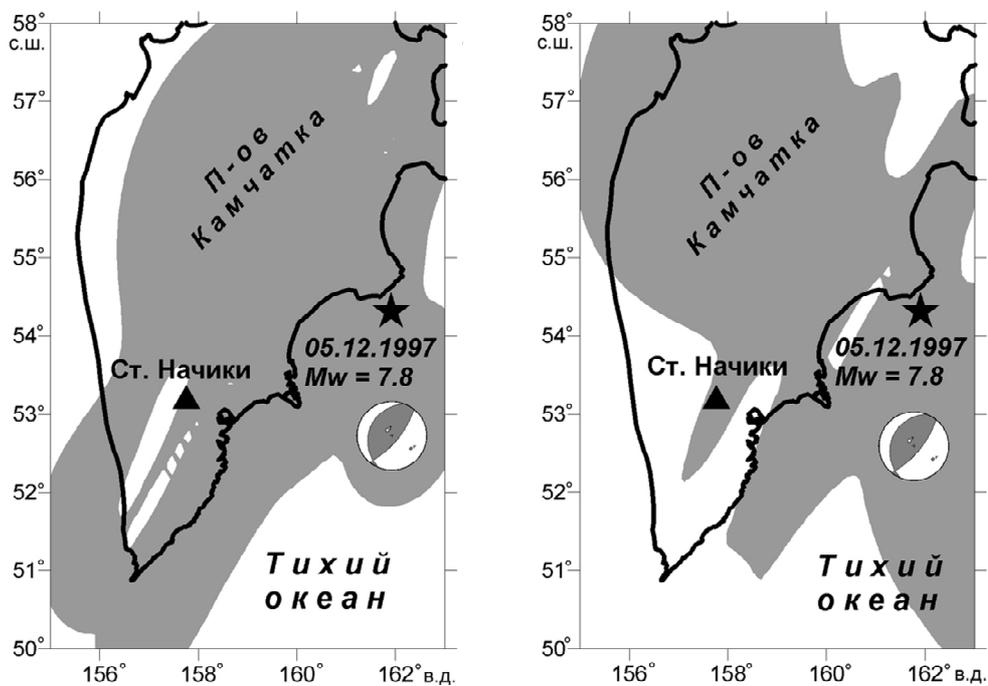


Рис. 4. Результаты моделирования приповерхностной зоны дилатансии D_t (слева) и вариации дилатансии δD (справа) для Кроноцкого землетрясения 05.12.1997, $M_w = 7.8$.

Условные обозначения аналогичны рис. 3.

подобны: в обоих случаях наблюдался сброс с элементами левостороннего сдвига по плоскости, ориентированной в субмеридиональном направлении. Корреляция волновых форм рассматриваемых землетрясений очень высока и на некоторых участках сейсмограмм каналов ВН станции IRIS “Петропавловск” значение коэффициента взаимной корреляции K_{cor} достигает 0.8. [30]. Идентичность механизмов указывает на однотипность подвижек в очагах, а анализ облака афтершоков показал распространение разрыва с глубины к поверхности, что характерно для субдукционных землетрясений этого диапазона глубин [21]. В работе [30] показано, что еще одной особенностью Тумрокских землетрясений является наличие у них афтершоковых последовательностей: это единственные землетрясения на глубинах порядка 200 км, для которых за время детальных сейсмологических наблюдений зафиксированы афтершоки.

Таким образом, основываясь на пространственной близости гипоцентров, схожести параметров очагов, высокой корреляции волновых форм, наличия афтершоков, не характерного для сильных камчатских землетрясений этого диапазона глубин, в работе [30] предлагается рассматривать Тумрокские землетрясения как дуплет – пару разнесенных во времени однотипных глубинных подвижек в локаль-

ной относительно упругой области, подготовка которых также должна иметь сходные черты.

Тумрокские землетрясения предварялись предвестниковым эффектом: перед обоими событиями на камчатских станциях “Начики” и “Карымшина” была зафиксирована стабилизация фазового сдвига между приливной компонентой ВСШ и приливной волной O_1 приливного потенциала, что подробно рассмотрено в [30]. Отметим лишь, что появление двух или более идентичных землетрясений в одном месте с разрывом во времени, достаточным для формирования предвестника, – явление редкое, даже уникальное. Оно дало возможность проверить и принципиально подтвердить воспроизводимость наблюдаемых эффектов в естественных условиях сейсмоактивного региона.

Стабилизация фазы приливной компоненты ВСШ для станции “Карымшина” перед землетрясением 10.06.2004 приведена на рис. 1г. Оба Тумрокских землетрясения были оперативно спрогнозированы по времени и магнитуде.

Результаты расчета зон D_{τ} и δD для Тумрокских землетрясений приведены на рис. 5, 6.

Области $D_{\tau} > 0$ схожи между собой, а области $\delta D > 0$ имеют сложную неправильную форму с ярко выраженными линейными структурами, простирающиеся которых соответствует азимуту основных плос-

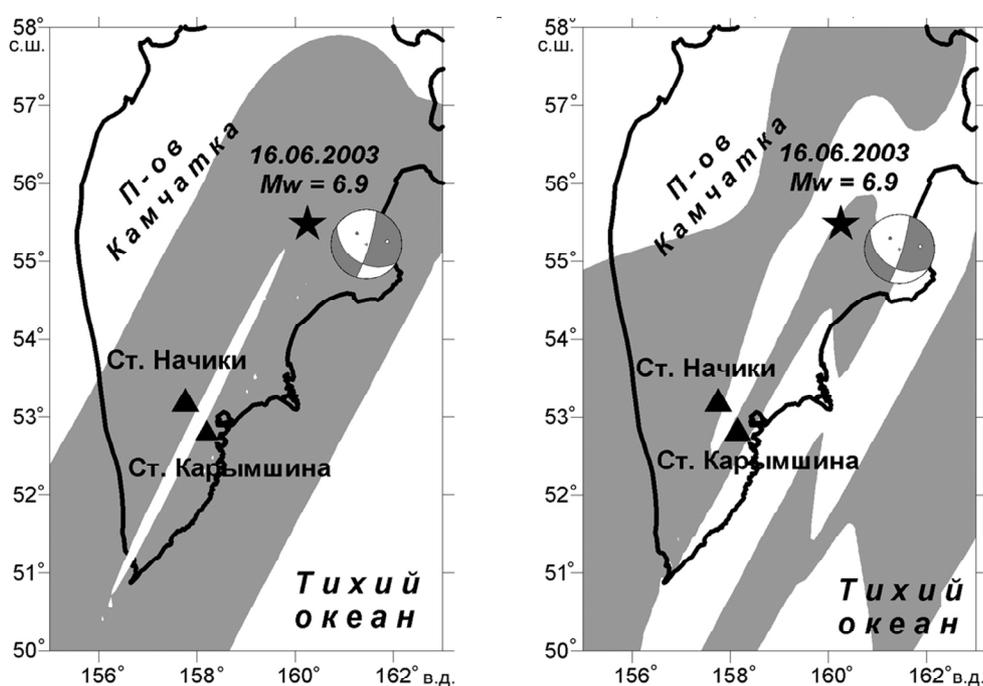


Рис. 5. Результаты моделирования приповерхностной зоны дилатансии D_{τ} (слева) и вариации дилатансии δD (справа) для землетрясения 16.06.2003, $M_w = 6.9$.

Условные обозначения аналогичны рис. 3.

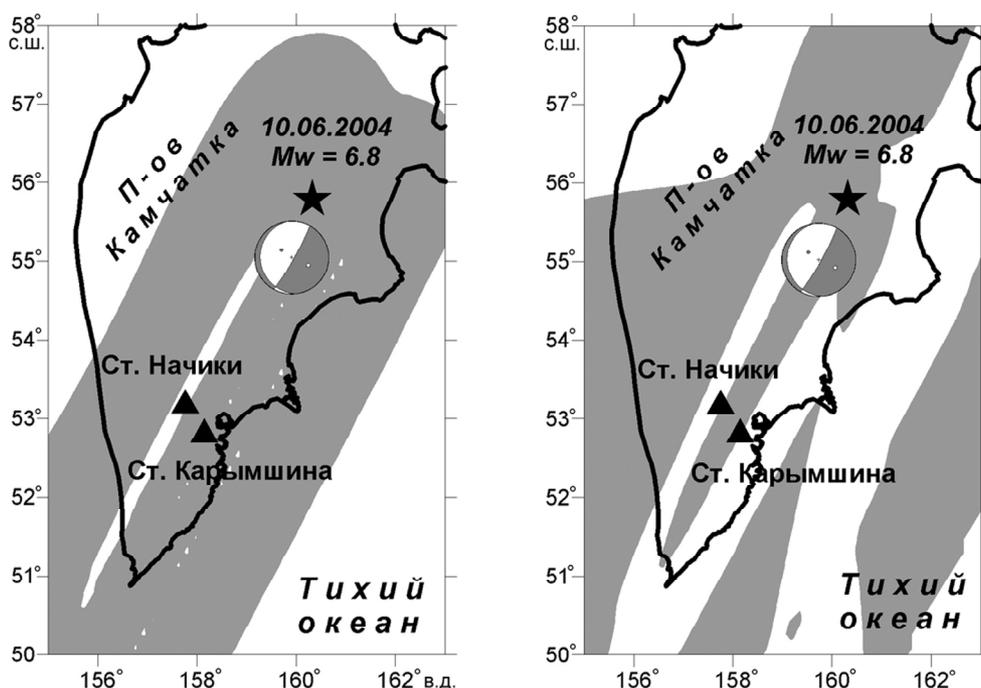


Рис. 6. Результаты моделирования приповерхностной зоны дилатансии D_τ (слева) и вариации дилатансии δD (справа) для землетрясения 10.06.2004, $M_w = 6.8$.

Условные обозначения аналогичны рис. 3.

костей разрыва в очагах Тумрокских землетрясений. Обе станции регистрации ВСШ – “Начики” и “Карымшина” – попадают в область положительных значений D_τ и δD в обоих случаях. Однако следует отметить различия во взаимном расположении станций и зон D_τ и δD . В частности, именно в этих примерах станции находятся вблизи границ “серых” зон.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и применен для численного моделирования алгоритм расчета зон дилатансии вблизи свободной поверхности.

Основные отличия предлагаемого подхода от построенных приповерхностных зон дилатансии, выполненных ранее другими авторами:

- использование модели протяженного очага землетрясения. Ранее применялись либо единичная сосредоточенная сила [1], либо пара сил без момента [3, 14, 18];

- уход от широко используемой в геомеханике модели плоского деформированного состояния (условие применимости такой модели – независимость смещений от одной из координат) к трехмерной модели;

- учет регионального компонента напряженно-деформированного состояния среды: задание

фоновых напряжений на основе модели готовящегося сильнейшего землетрясения с использованием данных по реальным сильнейшим сейсмическим событиям Камчатки за исторический период и предположения о фазе сейсмического цикла в настоящее время;

- использование в расчетах сейсмического КПД.

Следует отметить, что приведенную в работе [1] концепцию можно рассматривать как одну из возможных моделей формирующегося очага землетрясения. К сожалению, убедительных прямых экспериментальных доказательств вызванной очагом дилатансии в удаленных приповерхностных областях земной коры до сих пор не получено. Одной из возможных альтернатив может быть, например, одновременное независимое формирование как очага землетрясения, так и находящихся в метастабильном состоянии областей среды вблизи регистрирующих станций под действием вариаций регионального напряжения. Эта проблема требует дальнейшего изучения с привлечением дополнительных экспериментальных данных.

В ходе моделирования удалось выяснить:

- Существуют условия (набор параметров, не противоречащих физическим представлениям о реальных физических процессах, протекающих в реги-

оне), при которых модель допускает развитие приповерхностных зон дилатансии в окрестностях регистрирующей станции.

- Результаты существенно зависят от параметров и способа задания модельного сильнейшего землетрясения, определяющего фоновые значения напряжений в сканируемой области.

Выполненное моделирование является частью работ по разработке физических представлений об аномалиях отклика сейсмической эмиссии на земные приливы при изменениях напряженно-деформированного состояния среды, в частности, при подготовке региональных землетрясений. Результаты расчетов могут учитываться и при рассмотрении других предвестниковых эффектов, связанных с изменениями конфигурации трещинно-порового пространства, проницаемости, электропроводности среды и пр.

Результаты численных экспериментов в рамках принятых допущений решают проблему дальности очага землетрясения на удаленную ограниченную область сбора микросейсмической информации.

Авторы благодарят В.М. Павлова за разработку программного обеспечения и ценные методические советы. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 08-05-00692).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС, 2001. Вып. 32. С. 81–97.
- Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 447 с.
- Гольдин С. В., Назаров Л. А., Назарова Л. А., Козлова М.П. Оценка параметров очага готовящегося сейсмического события по данным о деформациях свободной поверхности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2007. № 3. С. 25–35.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.
- Гусев А.А. Сильные землетрясения Камчатки: расположение очагов в инструментальный период // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 39–42.
- Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород. М.: Изд-во МГУ, 2004. 222 с.
- Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 173 с.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Шишкин А.А. Первые результаты исследования сейсмических шумов на о. Шикотан по данным долговременных наблюдений // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 3. С. 33–43.
- 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.
- Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с $M_w=7.8$, $I_0=8$ (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 г. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 251–271.
- Левина В.И., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю., Иванова Е.И. Тумрокское-I землетрясение 16 июня 2003 г. с $M_w=6.9$, $I_0=6$ и Тумрокское-II землетрясение 10 июня 2004 г. с $M_w=6.8$, $I_0=5-6$ (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 2004 г. Обнинск: ГС РАН, 2009. С. 314–323.
- Лутиков А.И. Оценка эффективного радиуса влияния источников эндогенного микросейсмического шума // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 111–115.
- Назарова Л.А., Козлова М.П. Моделирование очаговых зон земной коры // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XIV Междунар. науч. школы им. акад. С.А. Христиановича. Симферополь, 2004. С. 100–102.
- Николаев А.В. Развитие нетрадиционных методов в геофизике // Физические основы сейсмического метода. М.: Наука, 1991. С. 5–17.
- Николаевский В.Н. Обзор: земная кора, дилатансия и землетрясения // Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. С. 133–215.
- Пат. 2105332 Российская Федерация. Способ контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений / В.А. Салтыков, В.И. Сеницын, В.Н. Чебров. № 94042027/25 – Заявл. 23.11.94. – Оpubл. 20.02.98. – Бюл. № 5.
- Пережогин А.С. О зонах геоакустической эмиссии в упругом приближении среды // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Вып. 13. № 1. С. 198–201.
- Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: ИЦК “Академкнига”, 2007. 406 с.
- Родкин М.В. Изменение характера сейсмичности с глубиной: новые эмпирические соотношения и их интерпретация // Физика Земли. 2004. № 10. С. 63–72.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Аппаратура и методы для исследования слабых сейсмических эффектов // Деп. В ВИНТИ 28.08.78, № 2919–78. Москва. 1978. 31 с.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли // Открытия в СССР в 1983 г. М.: ВНИИПИ, 1984. С. 46.
- Рыкунов Л.Н., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Характерные параметры высокочастотного сейсмического

- шума перед сильными камчатскими землетрясениями 1996 г. // Докл. РАН. 1998. Т. 361, № 3. С. 402–404.
25. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с.
 26. Салтыков В.А. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 3. С. 406–407.
 27. Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 73–83.
 28. Салтыков В.А., Касахара М., Гордеев Е.И. и др. Составляющие высокочастотного сейсмического шума на мысе Эримо (о. Хоккайдо, Япония) // Физика Земли. 2002. № 2. С. 83–91.
 29. Салтыков В.А., Чебров В.Н., Сеницын В.И. и др. Организация наблюдений сейсмических шумов вблизи сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 43–53.
 30. Салтыков В. А., Кугаенко Ю.А. Особенности пространственной связи приливной компоненты сейсмических шумов с областями подготовки сильных землетрясений (по материалам долговременных режимных наблюдений на Камчатке) // Физика Земли. 2007. № 9. С. 48–60.
 31. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Синхронизация фоновой сейсмичности и сейсмических шумов с приливами в областях подготовки сильных землетрясений // Геофизика XXI столетия: 2007 г. / Сб. трудов Девятого геофизического чтения им. В.В. Федынского (1-3 марта 2007 г., Москва). Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. С. 170–176.
 32. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110–124.
 33. Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А. Специализированная станция регистрации сейсмических шумов «Начики» в системе геофизического мониторинга Камчатки // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45, № 2. С. 24–41.
 34. Салтыков В.А., Патонин А.В. Стадийность акустической эмиссии при лабораторном моделировании приливных эффектов в сейсмичности // Докл. РАН. 2010. Т. 430, № 5. С. 693–696.
 35. Brace W.F., Paulding B.W., Scholz C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks // J. Geophys. Res. 1966. V.71, N 16. P. 3939–3952.
 36. Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting // Geophysical Monograph Series 170. AGU. 2006. 327 p.
 37. Kanamori H. The radiated energy of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake // Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting. Geophysical Monograph Series 170. AGU. 2006. P. 59–60.
 38. Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space // Bull. Seismological Soc. America. 1992. V. 82, N 2. P. 1018–1040.
 39. Purcaru G., Berckhemmer H. Qualitative Relations of Seismic Source Parameters and Classification of Earthquakes // Tectonophysics. 1982. V. 84. P. 57–128.
 40. Savage J.C. A Dislocation Model of Strain Accumulation and Release at a Subduction Zone // J. Geophys. Res. 1983. V. 88, N B6. P. 4984–4996.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

V.A. Saltykov, Yu.A. Kugaenko

Near-surface dilatancy zones as possible reason of anomalies in the parameters of seismic emission before strong earthquakes

Based on mathematical modeling, we estimated the length of dilatancy zones, developed near the earth surface during precondition for an earthquake. An algorithm for evaluation of dilatancy zones was devised and applied practically for numerical simulation. Computational examples of the development of near-surface dilatancy zones before the Kamchatka earthquakes with $M=6.7-7.8$ are shown. Results of numerical simulation in the framework of the adopted assumptions can solve the problem of preparing earthquake source effect upon the distant limited area of microseismic data gathering: the model allows development of near-surface dilatancy zones in the vicinity of seismic noise station, which can lead to the appearance of foreshock anomalies.

Key words: seismic emission, seismic noise, earthquake focus, dilatancy, Kamchatka.