

# МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТЫ ИЗОСЕЙСТ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА КАМЧАТКЕ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ЗАТУХАНИЯ

<sup>1</sup>Д.В. Чебров, <sup>2,1</sup>А.А. Гусев, <sup>1</sup>В.Н. Чебров

<sup>1</sup>Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский

**Аннотация.** Обсуждается задача построения для условий Камчатки карты изосейст сильного поверхностного землетрясения с учетом анизотропии затухания. Приведены первые результаты работы программы-прототипа, использующей физически обоснованную модель протяженного некогерентного очага и анизотропную модель затухания. Макросейсмические поля, построенные на основе такой модели, показывают удовлетворительное согласие с наблюдениями. Показана методика оценки анизотропии затухания среды. Предварительные результаты указывают, во-первых, на отсутствие существенной анизотропии в континентальной части Камчатки, а, во-вторых, на заметные вариации анизотропии вдоль Курило-Камчатской дуги.

**Abstract.** Problem of modeling isoseismal maps for strong shallow Kamchatka earthquakes anisotropic case is discussed for the case of anisotropic attenuation. We used physically substantiated model based on the concept of an incoherent extended earthquake source and anisotropic attenuation model. Macroseismic patterns, modeled this way, show good agreement with observations. The method of estimation of the degree of anisotropy of medium is demonstrated. Preliminary estimates of the degree of attenuation anisotropy indicate that is not uniform over the territory. Anisotropy is manifested prominently along the Pacific coast, but not uniformly; it is expressed at a lower degree near the junction of Kurile-Kamchatka and Aleutian arcs. Anisotropy is not seen for the continental part of Kamchatka.

## Введение

В случае сильного землетрясения для населения, администрации и спасательных служб большой интерес представляет информация об ущербе, который был нанесен инфраструктуре и застройке, а также оценка возможных человеческих жертв. Эти данные необходимы для планирования аварийно-спасательных работ. Чем раньше будет произведена подобная оценка, тем эффективнее могут быть принятые меры. Однако даже первичный сбор информации о фактическом ущербе может занимать многие часы после события. Если в интересующем районе развернута сейсмическая сеть, то имеется техническая возможность в режиме, близком к реальному времени, оценить вероятные параметры движения грунта и масштаб сотрясений по территории и получить представление о возможном ущербе. Для использующейся в настоящее время в России макросейсмической шкалы интенсивности (MSK-64) существуют соотношения, позволяющие оценить балл шкалы по параметрам колебаний. Чаще используется связь балл-ускорение, но существуют и соотношения, связывающие балл-скорость, в некоторых случаях также используют длительность сотрясений. Таким образом, имеется возможность получить распределение интенсивности сотрясений, определенной инструментально (далее – инструментальная интенсивность), которое позволяет перейти к оценкам ущерба. Однако это задача относительно просто решается при наличии достаточно плотных и работающих онлайн сетей приборов сильных движений. При недостаточной плотности приборов полезно скомбинировать оценки по фактическим наблюдениям с прогнозными оценками на основе известных гипоцентра и магнитуды землетрясения.

Данная работа посвящена разработке технологии, учитывающей современное состояние сейсмических сетей Камчатки и ее географические условия, которая позволит получать реалистичные карты сотрясений как в оперативном, так и в отложенном режиме. Введение таких инструментов в повседневную практику сейсмической службы позволит поднять эффективность спасательных служб, обеспечить более точную оперативную оценку сотрясений в важнейших пунктах, а также служить средством популяризации сейсмологии среди населения.

Станции сейсмической сети, развернутой в настоящее время на Дальнем Востоке, тяготеют к населенным пунктам. Таким образом, если пытаться получить карту сотрясений только по инструментальным данным, то задача сводится к восстановлению распределения величины по наблюдениям в узлах нерегулярной и практически редкой сетки. Широко известный пример решения похожей задачи – восстановление распределения макросейсмических интенсивностей путем комбинации расчетного (модельного) макросейсмического поля и наблюдаемого (инструментального). Этот подход, известный под названием «ShakeMap», был опробован впервые в Калифорнии [1], затем распространен на остальную часть США. Большое достоинство этой технологии в том, что она способна генерировать реалистичные оценки для любого уровня обеспеченности данными. Заметим, что в «ShakeMap» используется упрощенная протяженная модель очага, описанная в [2]. Это позволяет избежать крайне неправдоподобных круговых изосейст, которые неизбежно получаются при использовании эмпирических соотношений типа балл–магнитуда–расстояние.

Таким образом, в условиях современной обеспеченности Камчатки сейсмическими станциями представляется целесообразным использовать зарекомендовавшие себя комплексные подходы типа «ShakeMap», учитывая при этом специфику региона. С точки зрения генерации карт распределения сотрясений, к наиболее важным особенностям Камчатки относятся крайне нерегулярная сейсмическая сеть, преимущественное расположение очагов далеко в открытом море, ярко выраженная анизотропия (зависимость от азимута луча) для затухания в среде. Кроме того, здесь возможны землетрясения максимально возможной для планеты магнитуды. Это накладывает особые требования к реалистичности модельного поля: используемая модель должна позволять введение неоднородностей и анизотропии среды, а также учитывать протяженность очага. Ко всему прочему технология должна быть устойчива к недостатку данных и обеспечивать высокий уровень оперативности.

### **Концептуальная модель очага землетрясения и оперативная оценка его параметров**

В работе использовалась физически обоснованная модель, основанная на представлении протяженного некогерентного очага [3]. Предполагается, что вклады от некогерентно излучающих площадок суммируются в приемнике энергетически. Практически это позволяет разбить площадку очага на некоторое количество субисточников и просто суммировать их вклады в приемнике. Эта техника позволяет конструировать достаточно сложные очаги произвольной формы с любой желаемой детальностью. В данной работе использовался прямоугольный очаг с постоянной светимостью. Этот подход игнорирует временную структуру акселерограмм и использует прямую связь балла с интегралом от квадрата акселерограммы (интенсивностью по Ариасу).

В оперативном режиме в первые минуты после начала регистрации события мы можем рассчитывать лишь на положение гипоцентра землетрясения и его энергетическую оценку. В настоящее время нет работоспособных подходов к оценке геометрических параметров очага за срок порядка несколько минут. Поэтому для получения размеров очага приходится использовать какое-либо из многочисленных корреляционных соотношений. В данной работе используется связь моментной магнитуды с площадью разрыва, полученной в [4]. Ширина и длина разрыва находились по площади с помощью

соотношения длины и ширины (aspect ratio), заданного в виде зависимости от магнитуды землетрясения. При выборе ориентации плоскости разрыва решающим параметром остается азимут простирания очага землетрясения. Общепринятым подходом в подобных случаях является использование наиболее вероятного значения этого параметра. Угол падения не оказывает сильного влияния на вид макросейсмического поля. В данной работе он условно принят равным  $25^\circ$ , что приблизительно соответствует субдукционному надвигу. Характер распространения разрыва при расчетах принимался двухсторонним (симметрично от гипоцентра в обе стороны). Подстройка магнитуды в ретроспективном режиме выполнялась вручную, поскольку оперативные оценки магнитуды (по шкале  $M_S(20R)$ ) отличаются от оценок моментной магнитуды  $M_W$ .

#### **Анизотропия затухания и подходы к ее оценке по макросейсмическим данным**

Модифицируем функцию затухания так, чтобы ее показатель затухания зависел от направления:

$$\Phi(r, \varphi) = r^{-2n} \exp\left(-\frac{r}{r_Q \theta(\varphi)}\right), \quad (1)$$

где  $n$  – показатель степени расхождения волн;  $r_Q = cQ(f_1)/(2\pi f_1)$ , где  $f_1$  – средняя частота акселерограммы,  $cQ$  – скорость и добротность  $S$ -волн, а  $\theta(\varphi)$  – функция направленности, обеспечивающая разные значения функции затухания в зависимости от направления. Подобное приближение для  $r_Q$  аккуратно в случае, когда нас интересует узкая полоса частот волн группы  $S$ , но применимо как приближенное и в случае реальной нефильтрированной акселерограммы.

Одним из очевидных способов получить эллипсовидные изосейсты в рамках изложенной модели затухания – использовать эллиптическую функцию направленности:

$$\theta(\varphi) = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \epsilon_0^2 \cos^2(\varphi)}}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – малая полуось эллипса, а  $\epsilon_0$  – его эксцентриситет. Здесь используется нормировка функции направленности по приведенному радиусу.

Заметим, что использование такой функции направленности будет порождать эллипсовидные изосейсты, не являющиеся строгими эллипсами. Однако соотношение большой и малой осей фигуры изосейсты  $l$  даст реальное представление о соотношении осей эллипса  $\lambda$ , задающего функцию направленности. Нетрудно показать, что  $\lambda \approx l$ .

Сформулируем теперь кратко методику оценки анизотропии затухания по макросейсмическим данным, учитывая такие специфические условия Камчатки, как скудность данных и расположение очагов землетрясений в открытом море.

Для того чтобы в максимальной степени избавиться от эффекта протяженного очага, следует стремиться использовать изосейсту, проведенную в дальней зоне землетрясения, для эпицентральных расстояний больших, чем размеры очага. Однако следует учитывать, что оценка по изосейсте, охватывающей слишком большую площадь, дает соответствующее осреднение. Это может сгладить локальные особенности. Поэтому представляется более удобным и разумным использовать макросейсмические данные о землетрясениях средней силы ( $6.0 < M < 7.5$ ). Оценка отношения полуосей фигуры изосейсты дальней зоны такого землетрясения и азимута простирания ее большой оси дадут реалистичную оценку искомой функции направленности.

Заметим, что в большинстве случаев в условиях Камчатки очень сложно провести законченную изосейсту, а тем более их полный набор. Следует учитывать, что окончание большой оси фигуры изосейсты часто находится в открытом море, следовательно, оценки соотношения осей не могут считаться достаточно надежными. Однако их можно использовать в качестве первого приближения, а затем с помощью серии вычислительных экспериментов добиваться удовлетворительного согласия с наблюдаемыми данными.

### Программный модуль и его тестирование

Программный модуль (рабочее название – MacroMap), обеспечивающий генерацию карты сотрясений в режиме, близком к реальному времени, интегрирован в среду БЛИЦ [5]. На вход MacroMap подаются координаты гипоцентра и магнитуда, а также значения инструментальной интенсивности сотрясений на всех доступных станциях. Такие параметры, как вид функции  $\theta(\varphi)$ , параметры калибровки соотношений балл–магнитуда–расстояние и т.п., являются настроечными и устанавливаются до запуска программы. Возможен запуск модуля для моделирования поля сотрясений для исторических, или сценарных землетрясений.

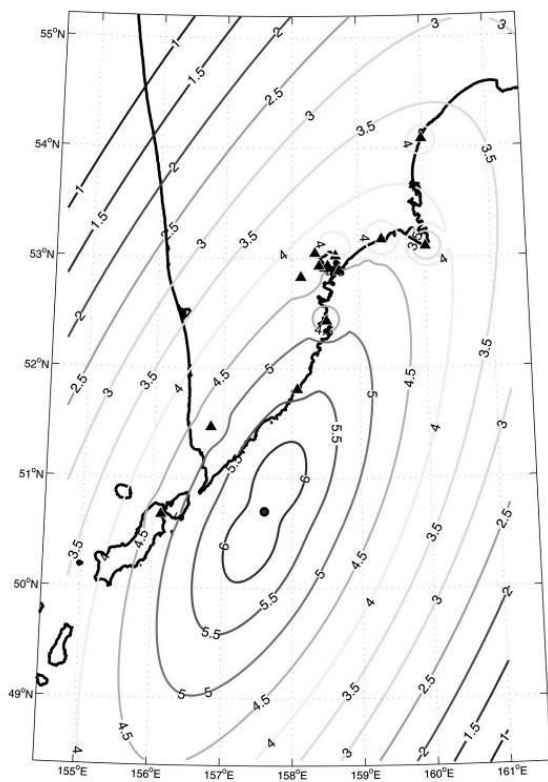
Расчет модельного макросейсмического поля производится на сетке узлов. Сетка задается автоматически: размер сетки – в зависимости от магнитуды, а расположение – в зависимости от положения эпицентра землетрясения.

Объединение данных двух полей интенсивности – модельного и эмпирического – реализовано методом взвешенного среднего, после пересчета обоих полей к единой координатной сетке, и подробно описано в [6].

Тестирование MacroMap производилось как в режиме эмуляции реального времени, так и в отложенном режиме для исторических событий и для сценарного землетрясения [6].

На нескольких примерах опробована техника оценки анизотропии затухания для Карымского землетрясения 1 января 1996 г. и для двух ощутимых землетрясений 2013 г. (28 февраля на юге Камчатки и 12 ноября вблизи Кроноцкого п-ова).

По данным макросейсмических опросов была оценена анизотропия затухания для каждого из этих случаев, а затем построены карты сотрясений: для Карымского землетрясения – карта модельного поля сотрясений в отложенном режиме, а для землетрясений 2013 г. – комплект карт с разной степенью комплексирования данных в режиме эмуляции реального времени и в отложенном режиме.



**Рис. 1.** Расчет макросейсмического поля для землетрясения 28.02.2013 г. с учетом инструментальных данных

Для Карымского землетрясения оцененная функция затухания оказалась близка к изотропной. Применение такой функции показало хорошее согласие с данными макросейсмического опроса в дальней зоне (IV–V баллов в Петропавловске и Мильково).

Оценка анизотропии для землетрясения 28 февраля показала неожиданно высокое отношение осей функции направленности – 3.5:1. Модельное поле показывает удовлетворительное согласие с инструментальными данными и с данными макросейсмического опроса (рис. 1). Степень искажения изосейст результирующего поля в большей степени объясняется особенностями выбора весовых функций при осреднении.

Оценка анизотропии для землетрясения 12 ноября соответствует соотношению осей функции направленности 1.7:1. Модельное поле демонстрирует хорошее согласие с инструментальными данными. Согласие с данными макросейсмического опроса не такое хорошее: сотрясения в ближайших к эпицентру точках оценены выше, чем предсказывает модель.

## Заключение

Оперативные карты сотрясений – это наглядный и понятный продукт системы сейсмических наблюдений. Он может использоваться для информирования граждан и властей, при планировании аварийно-спасательных работ в случае сильного землетрясения, при учениях и тренировках, а также и для исследовательских работ. Внедрение соответствующих технологий в России сдерживалось отсутствием достаточно плотных сетей наблюдений. Однако прогресс, наметившийся здесь в последние годы, дает возможность применения подобных методик и в нашей стране.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект №14-17-00621).**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wald D., Quitoriano V., Heaton T., Kanamori H., Scrivner C., Worden C.* TriNet "ShakeMaps": Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in Southern California // *Earthq. Spectra*. – 1999. – V. 15, N 3. – P. 537–555.
2. *Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E.* Equations for estimating horizontal response spectral and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work // *Seismol. Res. Lett.* – 1997. – V. 68. – P. 128–153.
3. *Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Моделирование связи балл–магнитуда–расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // *Вулканология и сейсмология*. – 1999. – № 4–5. – С. 29–40.
4. *Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. – 1990. – № 6. – С. 55–63.
5. *Чебров Д.В., Гусев А.А.* Автоматическое определение параметров цунамигенных землетрясений на Дальнем Востоке России в режиме реального времени: алгоритмы и программное обеспечение // *Сейсмические приборы*. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 35–57.
6. *Чебров Д.В., Гусев А.А., Чебров В.Н.* Первый вариант алгоритма и программы для автоматического создания карты сотрясений от произошедшего сильного землетрясения в оперативном режиме // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды IV научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 30 сентября – 6 октября 2013 г.* – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 294–298.