

ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОЗДАНИЯ КАРТЫ СОТЯСЕНИЙ ОТ ПРОИЗОШЕДШЕГО СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ОПЕРАТИВНОМ РЕЖИМЕ

Чебров Д.В.¹, Гусев А.А.², Чебров В.Н.¹

¹*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, danila@emsd.ru*

²*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

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. Важно, что чем раньше будет произведена подобная оценка, тем эффективнее могут быть приняты меры. Но даже первичный сбор информации о произошедшем ущербе может занимать несколько часов после события; если же, как обычно бывает, оказываются повреждены или перегружены до неэффективности каналы связи, то задача дополнительно усложняется. Если же в интересующем районе развернута сейсмическая сеть, то имеется техническая возможность в режиме, близком к реальному времени, оценить параметры движения грунта и масштаб сотрясений. Для используемой в настоящее время в России макросейсмической шкалы интенсивности (MSK-64) [5], 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. Когда плотность приборов низкая, полезно скомбинировать оценки по фактическим наблюдениям с прогнозными оценками на основе известных гипоцентра и магнитуды землетрясения.

Мы ставим себе задачу разработать технологию, которая позволит оперативно получать карты сотрясений с учетом современного состояния сейсмических сетей и географических условий Камчатки. В настоящей работе описывается первый вариант алгоритма расчета оперативной карты сотрясений. Алгоритм опробован ретроспективно на примере землетрясения 28 февраля 2013 г на Южной Камчатке с моментной магнитудой $M_w = 6.8$, с координатами эпицентра 50.67° с.ш., 157.77° в.д.

Обзор проблемы

В настоящее время сейсмическая сеть на Дальнем Востоке России активно развивается. Помимо достаточно представительной сети велосиметров появилась сеть акселерометров [6, 8]. В окрестностях крупных населенных пунктов (Петропавловск-Камчатский, Усть-Большерецк, Южно-Сахалинск и др.) развернуты группы приборов сильных движений. Это обеспечивает возможность получать вполне состоятельные оценки инструментальной интенсивности в реальном времени в пунктах наблюдений.

Станции сейсмической сети, развернутой в настоящее время на Дальнем Востоке, тяготеют к населенным пунктам. Это объясняется удобством установки и обслуживания. К станциям вне населенных пунктов нередко можно добраться только воздушным транспортом; к тому же, серьезная практическая проблема – случайный или преднамеренный вандализм. Заметим, что подобного принципа организации сети, в общих чертах, придерживаются, например, в Калифорнии, США [14]. Даже в условиях относительно хорошо населенной местности остаются районы, где расстояние до ближайшей сейсмостанции может достигать сотен километров.

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.

Второй метод получения карты распределения сотрясений – это воспользоваться эмпирическими соотношениями типа балл-магнитуда-расстояние. Не вдаваясь в дискуссии о преимуществах конкретных формул, заметим, что почти все они имеют аргументом расстояние до очага, что автоматически приводит к изолиниям сотрясений в виде концентрических окружностей.

Практика показывает, что распределения интенсивности сотрясений редко имеют простой вид: изосейсты в лучшем случае имеют вид эллипсов. В мировой практике имеются и намного более сложные случаи (см. например [15]). Таким образом, описание карты сотрясений через два параметра (гипоцентр и магнитуду) с использованием какого-либо уравнения макросейсмического поля и в представлении точечного источника, и с упрощенным учетом протяженности очага будет недостаточно реалистичным. Круговые изосейсты особенно неправдоподобны для очагов с $M = 8-9$, когда протяженность очага может достигать несколько сотен километров. Для преодоления этой трудности необходимо вводить в модель геометрические параметры очага – длину и ширину разрыва, а также задавать его расположение в пространстве.

Первое приближение реалистичных изосейст от протяженного очага дает достаточно простая техника, описанное в [12]. Максимально правдоподобные результаты можно получить путем решения прямой задачи [13], однако этот способ достаточно громоздкий и годится только для отложенной обработки данных.

Очевидно, что первый метод восстановления макросейсмического поля можно без ограничений применять в районах, где сети наблюдений чрезвычайно плотные. Пожалуй, самый яркий пример здесь – это Япония. Помимо сейсмической сети Японского метеорологического агентства, насчитывающей более 4500 станций, также существует ряд локальных сетей. Напротив, в случае редкой сети можно в основном полагаться на эмпирические соотношения и модельные расчеты.

Для случая очень нерегулярной сети (сгущения станций в населенных пунктах и редкая сеть на большей части территории), было предложено восстанавливать распределения макросейсмических интенсивностей комбинируя расчетное (модельное) макросейсмическое поле и наблюдаемое (инструментальное). Этот подход, известный под названием «ShakeMap» был опробован впервые в Калифорнии [16], затем распространен на остальную часть США. Большое достоинство этой технологии в том, что она способна генерировать реалистичные оценки для любого уровня обеспеченности данными.

Несмотря на заметный прогресс последних лет в развитии сетей наблюдений на Дальнем Востоке, обеспеченность сейсмическими станциями этого региона далека от мирового уровня. Поэтому использование только инструментальных наблюдений при восстановлении карты сотрясений не позволяет получить реалистичной картины. Существенно усложняет задачу также наличие обширных акваторий, что делает в ряде случаев невозможной интерполяцию, а тем более экстраполяцию данных. Учитывая исключительно низкую населенность этих территорий и их труднодоступность, сложно в обозримом будущем рассчитывать на развертывание регулярной плотной сейсмической сети.

Таким образом, 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 допустимой для планеты магнитуды.

Отсюда следует, что реализуемая технология должна быть устойчива к недостатку данных (который может быть вызван как отсутствием станции в ближней зоне, так и разрушением пункта наблюдений или его каналов связи). Применяющаяся технология моделирования поля сотрясений должна позволять введение неоднородности и анизотропии среды, а также корректно обрабатывать случаи протяженных очагов. Ко всему прочему, используемые технологии должны обеспечивать высокий уровень оперативности.

Концептуальная модель очага землетрясения и рабочая оценка площадки разрыва

Нами была использована физически обоснованная модель, основанная на представлении некогерентного протяженного очага [3], которая ранее уже применялась для условий Камчатки [4]. Предполагается, что очаг представляет собой площадку, элементы которой излучают короткопериодное излучение независимо (некогерентно). Это значит, что вклады разных 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, а также задавать структуру светимости площадки. 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, следуя [3] мы используем связь моментной магнитуды с площадью разрыва, полученной в работе [2]. Ширина и длина разрыва находились по площади с помощью заданного соотношения длины и ширины (aspect ratio). Для данного землетрясения значение AR было принятым равным 4. Поясним, что корреляция площади очага с магнитудой при больших магнитудах довольно тесная.

В условиях Камчатки достаточно ясен реалистический выбор ориентации плоскости разрыва. Здесь решающим параметром будет простирание очага землетрясения, поскольку степень влияния угла падения на картину изосейст менее выражена. Общепризнанным подходом в подобных случаях является использовать наиболее вероятное значение этого параметра. Обычно конструируется некая сейсмо-тектоническая схема, с нужным уровнем детальности, или же используется существующая. В данной работе используется значение азимута угла простирания очага землетрясения 23° (ССВ). Для большинства крупных землетрясений Камчатки такое значение является вполне реалистическим. Угол падения условно принят равным 25° , что приблизительно соответствует субдукционному надвику.

Более труден реалистический выбор характера распространения разрыва от эпицентра (одностороннее, или двустороннее). В расчетах условно выбран вариант двустороннего распространения (симметрично от гипоцентра в обе стороны). Не составляет трудностей дополнительный расчет двух вариантов одностороннего распространения (на ССИ или на ЮЮЗ). При оперативной работе вполне возможна подгонка параметров землетрясения под наблюдения: перемещение очаговой области в пределах $\pm L/2$ от вычисленного положения эпицентра, где L – длина разрыва; для этого наиболее реально использовать координаты первых нескольких афтершоков. Нетрудно также подправить, при наличии дополнительных данных, значения магнитуды, азимута простирания и угла падения площадки очага, а также глубины. Надо отметить, что проблема магнитуд в оперативном режиме стоит достаточно остро: надежно и быстро можно оценить локальную магнитуду, магнитуду по объемным волнам, энергетический класс и варианты магнитуды по поверхностным волнам M_s . Используемая методика откалибрована по моментной магнитуде M_w . Для магнитуд ниже 8.0–8.2 можно считать, что $M_w \approx M_s$. Однако для сильнейших, и, как следствие, самых опасных землетрясений требуется прямая оценка моментной магнитуды. Возможный выход – использование, следуя [1], модифицированного варианта так называемой магнитуды Цубои M_{WP} .

В данной работе подстройка магнитуды выполнялась вручную. Оценка $M_S(20R)$ была поправлена на величину систематической погрешности относительно оценок M_S [10], таким образом, полученное значение оказалось близко к оценкам M_w , сделанным позже.

Структура программного модуля и алгоритм создания карты сотрясений

Программный модуль (рабочее название – MacroMap), обеспечивающий генерацию карты сотрясений в режиме, близком к реальному времени интегрирован в среду БЛИЦ [9]. В настоящее время программа-прототип работает в режиме эмуляции реального времени. При создании модуля использовались наработки по расчету макросейсмической интенсивности и параметров движения грунта [7], а также адаптированный под структуру данных БЛИЦ расчетный блок, созданный А.А. Гусевым и описанный в [3]. Сигнал на запуск модуля выдается при выполнении следующих условий: идет обработка события; получены координаты землетрясения; получена надежная оценка магнитуды. На вход MacroMap подаются координаты гипоцентра и магнитуда, а также значения инструментальной интенсивности сотрясений на всех доступных станциях [7]. Такие параметры как вид функции $AR(M)$, параметры калибровки соотношений балл-магнитуда-расстояние и т.п. являются настроочными и устанавливаются до запуска программы.

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 – реализована методом взвешенного среднего, после пересчета обоих полей к единой координатной сетке. В данной работе результирующее поле восстанавливается на модельной координатной сетке. Классическая техника «ShakeMap» предполагает, что по умолчанию доверие к инструментальным данным много

выше, чем к модельным. Поэтому, во время процедуры восстановления результирующего поля не учитываются результаты модельного расчета для узлов сетки, находящихся ближе 15 км к реальным станциям. Мы используем более гибкую схему комплексирования, с использованием весовых функций. Задание весов определяет для каждого узла относительную степень доверия к данным двух родов. В общем виде значения весов зависят от координат узла сетки, для которого восстанавливается результирующее поле. Используемая весовая функция для наблюдаемых данных убывает по закону «косинусного окна»; для i -той станции она запишется как:

$$W_O^i(r_i(x, y)) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\cos\left(\frac{r_i}{r_n^i} \pi\right) + 1 \right), & r_i \leq r_n^i \\ 0, & r_i > r_n^i \end{cases}$$

где i – номер станции из набора станций, для которых существуют эмпирические данные, r_i – расстояние от узла координатной сетки (x, y) до i -той станции, r_n^i – размер «области влияния» станции.

Для модельного поля сконструирована функция, монотонно убывающая с ростом расстояния от эпицентра и переходящая в константу на эпицентральных расстояниях, более 150 км. Уровень константы равен 0.9 значения функции в эпицентре.

Оценки из двух источников суммируются с учетом так полученных весов. Формула для расчета результирующей оценки поля интенсивности I_R в точке с координатами (x, y) запишется так:

$$I_R(x, y) = \frac{1}{A_M W_M + A_O \sum_i W_O^i} \left[A_M W_M I_M(x, y) + A_O \sum_i W_O^i I_O^i \right]$$

где i – номер пункта наблюдения инструментальной интенсивности, W_M, W_O – значения весовых функций в точке (x, y) для модельного поля, инструментальных наблюдений и экспертных оценок соответственно. $I_M(x, y)$ – значение модельного поля в точке (x, y) , I_O^i – инструментальная интенсивность на i -той станции. Соотношение нормировочных коэффициентов A_M и A_O задают степень доверия разным типам данных. При расчетах в работе использовалось отношение $A_M/A_O = 0.7$. В рамках изложенной схемы возможно нормировать каждую станцию индивидуально: тогда возникнет набор нормировочных коэффициентов A_O^i , соответственно модифицируется второе слагаемое в скобках: $\sum_i A_O^i W_O^i I_O^i$. Подобным образом изменится и второе слагаемое в знаменателе.

В идеале, значения I_O должны быть приведены к среднему грунту – именно к нему относятся расчетные оценки. К сожалению, пока поправки за грунт для многих станций пока не определены. При наличии поправок они использовались в счете.

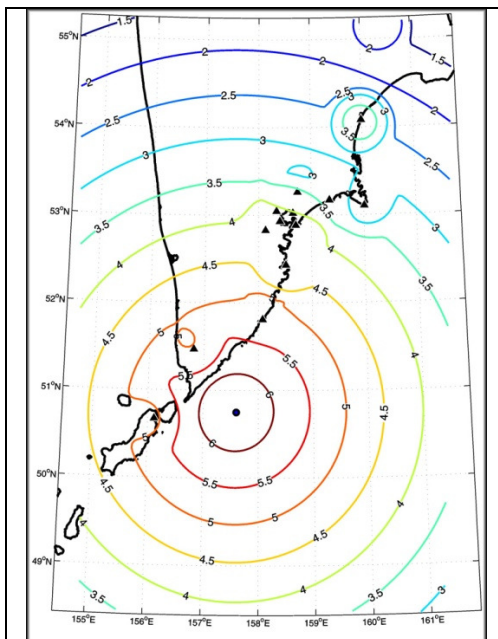


Рис. 1 Карта сотрясений, полученная в режиме эмуляции реального времени

Имеется возможность добавить данные оперативного макросейсмического обследования или опроса (экспертные оценки). Схема их учета та же, что и для инструментальных данных. Нормировочные коэффициенты A_E и радиусы r_n соответствующих весовых функций $W_E^i(x, y)$ могут выбираться иначе. Выбор «амплитуд» может зависеть в частности от степени доверия к конкретному значению наблюдаемого балла (эта степень зависит от профессионального уровня эксперта, числа опросных листов и т.п.).

Тестирование модуля: результаты и обсуждение

Тестирование созданного модуля производилось в режиме эмуляции реального времени на записях землетрясения 28 февраля 2013 года на Южной Камчатке. На Рис. 1 представлен результат комбинации модельного и инструментального полей. Можно констатировать, что созданная программа вполне работоспособна. Для сильнейших землетрясений модельное поле имеет реалистичные эллипсоидные изосейсты. (В данном случае при $M_w = 6.8$ лишь первая изосейста слегка эллиптическая). Значения инструментальной интенсивности на многих

станциях заметно отклоняются от предсказанных значений. Вероятные причины этого кроются в отсутствии поправок за грунт, а также в сильной анизотропии поглощения в среде в районе Камчатского полуострова, которая не учтена в используемой модели.

Заключение

Оперативные карты сотрясений – это наглядный и понятный продукт системы сейсмических наблюдений. Он может использоваться для информации граждан и властей, при планировании аварийно-спасательных работ в случае сильного землетрясения, при учениях и тренировках, а также и для исследовательских работ.

Технологии, подобные американскому «ShakeMap», японскому «SIGNAL/SUPREME», тайваньскому «RRS» и др. развиваются и применяются в мире с середины 90-х гг. Внедрение их в России сдерживалось отсутствием достаточно плотных сетей наблюдений. Однако, прогресс, наметившийся здесь в последние годы, обеспечивает возможность применения схожей методики для оперативного построения карт сотрясений.

В данной работе обсуждена постановка задачи в условиях Камчатки и приведены первые результаты работы программы-прототипа. Доработка программы требует учета поправок на станциях за грунт, а также введением в модель анизотропии среды.

Список литературы

1. Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Федосеева Е.Н. Оперативная оценка магнитуды M_{WP} умеренных и сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам // IV научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». г. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября — 5 октября 2013 г.
2. Гусев А.А. Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. №6. С. 55–63.
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., Шумилина Л.С., Акатова К.Н. Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // Электрон. науч.-информ. журнал «Вестник ОГГГН РАН». М.: ОИФЗ РАН, 2005. № 1(23). URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2005/screp-2.pdf
5. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. Стройиздат. 1962.
6. Чебров В.Н., Гусев А.А., В.К. Гусяков В.К., Мишаткин В.Н., Поплавский А.А. Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. // Сейсмические приборы. 2009. Т.45. № 4
7. Чебров В.Н., Гусев А.А., Чебров Д.В. Методика, алгоритмы и программное обеспечение для подачи немедленной тревоги цунами до завершения расчетов магнитуды и эпицентра землетрясения // 50 лет сейсмологических наблюдений на Камчатке 1961–2011. Труды III Научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2011. С. 468–471.
8. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология, 2013. №1. С. 18–40.
9. 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.
10. Чебров Д.В., Чебров В.Н., Викулина С.А., Отогук Д.А. Опыт оценки магнитуд сильных землетрясений в РИОЦ «Петропавловск» в рамках службы цунами // IV научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». г. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября — 5 октября 2013 г.
11. Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двадцатисекундная региональная магнитуда $M_S(20R)$ для Дальнего Востока России. // Сейсмические приборы. 2010. Т.46. № 3. С. 58–63.
12. 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 // Seism. Res. Lett. 1997. V. 68. P. 128–153.
13. Dreger, D. S. and A. Kaverina, (2000). Seismic remote sensing for the source process and near-source strong shaking: a case study of the Hector Mine earthquake // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. P. 1941–1944.
14. Mori J., Kanamori H., Davis J., Hauksson E., Clayton R., Heaton H., Jones L., Shakal A., Porcella R. Major improvements in progress for southern California earthquake monitoring // Eos Trans. AGU. 1998. V. 79. №18. P. 217– 221.
15. Sorensen M., Stromeyer D., Grunthal G. Estimation of macroseismic intensity – new attenuation and intensity vs. ground motion relations for different parts of Europe // The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing. October 12–17, 2008.
16. 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 // Earthquake Spectra. 1999. Vol. 15. №3. P. 537–555.