

УДК 551.24

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО КАТАЛОГА ЦУНАМИГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ЕЕ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

Ландер А.В.¹, Пинегина Т.К.²

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва,
land@mitp.ru

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

Введение

Одним из главных подходов к решению задачи цунамирайонирования является использование синтетического каталога землетрясений, моделирующего сейсмический процесс в исследуемом регионе. Каталог должен содержать все параметры, необходимые для расчета порожденной землетрясением волны цунами, и обладать статистическими свойствами максимально приближенными к потоку реально наблюдаемых событий. Это позволяет в дальнейшем перейти от свойств сейсмичности к вероятностным распределениям параметров взаимодействия цунами с побережьем, которые являются окончательной целью решаемой задачи цунамирайонирования.

Окончательная методика выработки синтетического каталога подразумевает предварительное построение эмпирических распределений всех необходимых параметров землетрясений. Предполагается, что поток событий, составляющих каталог, стационарен, то есть все эмпирические распределения не зависят от времени. Однако пространственной однородности не предполагается. Зависимость от географических координат описывается медленно меняющимися трендами параметров распределений, которые также являются предметом предварительных исследований. Таким образом методика построения синтетического каталога в значительной своей части оказывается принципиально привязанной к конкретному региону. Для переноса методики на другой регион требуется исследование новых эмпирических распределений. Описанная ниже компьютерная программа, моделирует цунамигенный сейсмический процесс у восточного побережья Камчатки и Северных Курил.

Среди свойств сейсмического потока в рассматриваемой задаче особое место занимает закон повторяемости землетрясений (Гутенберга-Рихтера), подразумевающий, что полный каталог состоит в основном из относительно слабых событий, а наиболее важные для расчета цунамиопасности модели землетрясений встречаются в нем весьма редко. Использование такого каталога для расчета вероятности воздействий цунами не рационально. В то же время закон повторяемости может быть учтен после этапа расчета волн цунами. Для других параметров землетрясений такая проблема отсутствует. Поэтому рациональнее вместо одного общего каталога создать серию подкаталогов в каждом из которых магнитуда фиксирована, а остальные параметры вырабатываются с частотами, соответствующими своим эмпирическим распределениям.

Обсуждаемый генератор модельных землетрясений Камчатки реализует указанный выше подход. При каждом запуске программы вырабатывается последовательность (в событийной шкале), соответствующая выборке из полного синтетического каталога землетрясений определенной магнитуды, которая является входным параметром. Дальнейший расчет волн цунами и учет закона повторяемости здесь не рассматривается.

Параметры модельных землетрясений, входящие в каталог и данные, использованные для построения эмпирических распределений

В принятом приближении очаг землетрясения описывается плоской прямоугольной дислокацией (разрывом), возникающей в однородном полупространстве, и приводящей к деформации морского дна и, как следствие, возникновению волны цунами. Предполагается, что верхняя кромка площадки разрыва (обычно располагающаяся вблизи поверхности) горизонтальна. Содержащиеся в каталоге параметры землетрясений:

- **Lat, Lon, Dep** - географические координаты и глубина центроида (центра дислокации).
- **L, W, S и U** - масштабные параметры очага: длина, ширина, площадь ($S=L*W$) и амплитуда подвижки (относительного смещения крыльев дислокации).

- **M0, Mw** - скалярный сейсмический момент ($M_0 = \mu \cdot L \cdot W \cdot U$, где μ - модуль сдвига) и моментная магнитуда ($M_w = 2/3 \cdot \log(M_0) - 10.73$).

- **Strike, Dip, Rake** - "механизм землетрясения" - углы определяющие пространственное расположение дислокации: простирание и падение плоскости разрыва, а также направление подвижки по этой плоскости [1]. Поскольку верхняя кромка площадки разрыва предполагается горизонтальной, параметр Strike одновременно определяет поворот всей площадки относительно вертикальной оси.

Параметры Lat, Lon, Dep, Strike, Dip, Rake - вырабатываются случайным образом на основе соответствующих (заложенных в программу) эмпирических распределений. Mw является входным параметром программы. Размеры очага и величина

подвижки вычисляются как детерминированные функции Mw на основе заимствованных из литературы эмпирических соотношений [5, 6]:

длина L [km]	$\log L = 0.55M - 2.19$
ширина W [km]	$\log W = 0.31M - 0.63$
площадь S [km ²]	$\log S = 0.86M - 2.82$
подвижка U [m]	$\log U = 0.64M - 4.78$

В некоторых случаях, когда очаг выходит за пределы допустимой географической области (зоны субдукции) параметры длины и ширины очага могут корректироваться с сохранением значения площади.

Для выбора географической области, в которой располагаются модельные события использованы многочисленные мировые и региональные каталоги, содержащие основные параметры землетрясений и в целом охватывающие полный период инструментальных наблюдений сейсмичности 1900-2018 гг. Данные о центроидах и тензорах сейсмического момента землетрясений за

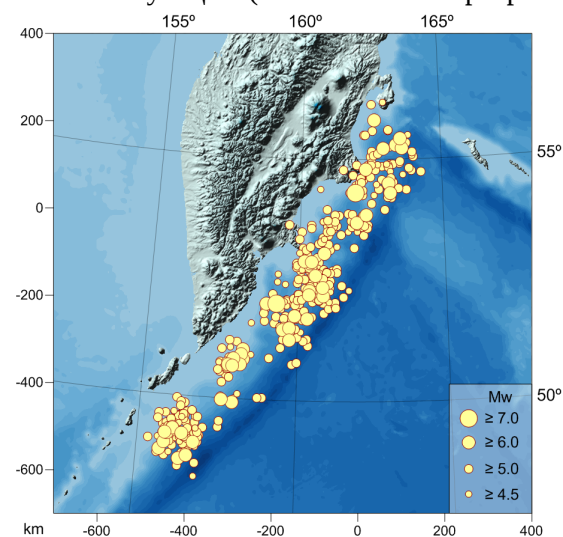


Рис. 1. Эпицентры центроидов субдукционных землетрясений, использованных для построения эмпирических вероятностных распределений параметров механизмов землетрясений.

период 1976-2018.06 гг. получены из каталога GCMТ [4] (рис. 1).

Для упрощения зависимости эмпирических распределений от географического положения их построение и внутренние вычисления в программе проводятся в специальной косоугольной цилиндрической проекции с полюсом в точке с географическими координатами: 58.951 N, 122.956 E. В данной проекции (рис.2) Курило-Камчатский желоб простирается приблизительно параллельно оси абсцисс X, а вектор движения Тихоокеанской плиты относительно Камчатки направлен приблизительно вдоль оси ординат Y. Третья координатная ось Z соответствует глубине и направлена вертикально вниз. Свойства землетрясений данного региона меняются в основном закономерно вдоль одной из осей данной проекции. Это позволяет рассматривать тренды распределений в упрощенном виде как функции одной переменной.

Ниже описано построение эмпирических распределений независимых параметров, входящих в синтетический каталог.

Распределение координат эпицентра центроида (Lat, Lon)

Большинство сильнейших землетрясений региона происходит в зоне субдукции. Потенциально цунамигенная верхняя пологая (~20°) часть сейсмофокальной зоны, соответствующая в плане полосе шириной около 150 км, протянувшейся параллельно и северо-западнее желоба. Западнее зона субдукции круто погружается под континент, и происходящие там промежуточные по глубине землетрясения, не представляют цунами-опасности. В данной реализации каталог строится на участке зоны субдукции севернее приблизительно 48° с.ш. На северо-востоке зона ограничена Алеутской дугой. Точное положение географической области, в пределах которой строится каталог показано в цилиндрической проекции на рис.2. Область построена по выборке землетрясений выполненной согласно трехмерной компьютерной регионализации Камчатской сейсмоактивной области [2], описанной в [3]. Поскольку нас интересуют модели цунамигенных землетрясений, глубина использованных событий ограничена 70 км.

Цунамигенными могут быть и землетрясения, происходящие восточнее на внешнем склоне желоба и океаническом валу. Однако эти события обладают существенно отличными от

субдукционных очаговыми свойствами и требуют построения отличных эмпирических распределений. В данной программной реализации такие землетрясения не рассматриваются.

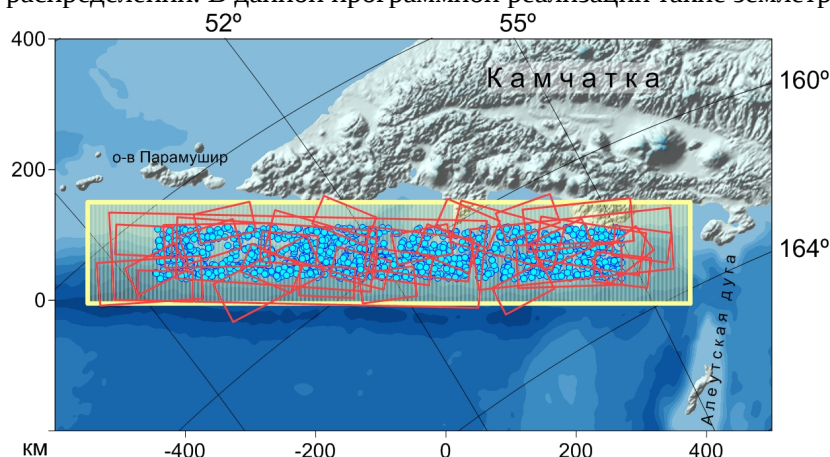


Рис.2. Географическая область, в которой строится синтетический каталог цунамигенных землетрясений - желтый прямоугольник. Маленькими синими кружками обозначены центры генерированной последовательности 1000 очагов с фиксированной магнитудой 8.2 (тот факт, что они занимают не всю область объясняется в тексте). Красные прямоугольники - проекции на свободную поверхность ряда модельных очагов с магнитудами из интервала 7.5 - 9.0.

очагового прямоугольника. В качестве допустимого положения центра рассматривается только оставшаяся (после вычитания запрещенных полос) внутренняя часть области. В значительной мере такое построение обеспечивает необходимое положение очагов.

Фиксируемые реальные слабые землетрясения неравномерно распределены в пределах сейсмофокальной зоны. Однако нас в первую очередь интересуют сильные события, очаги которых занимают значительную часть ее площади. Имеющаяся на сегодня статистика не позволяет строить априорные пространственные распределения крупных очагов. Поэтому в рассматриваемой методике мы используем *равномерные распределения центров* внутри допустимой для них области (зависящей от магнитуды события). В программе координаты эпицентров вырабатываются в цилиндрической проекции. Последняя близка к равноплощадной. Поэтому равномерное распределение эпицентров сохраняется и на сферической земной поверхности. Пример каталога эпицентров приведен на рис.2

Распределение глубины центра (Dep)

При задании третьей координаты центра - глубины предполагается, что его случайный

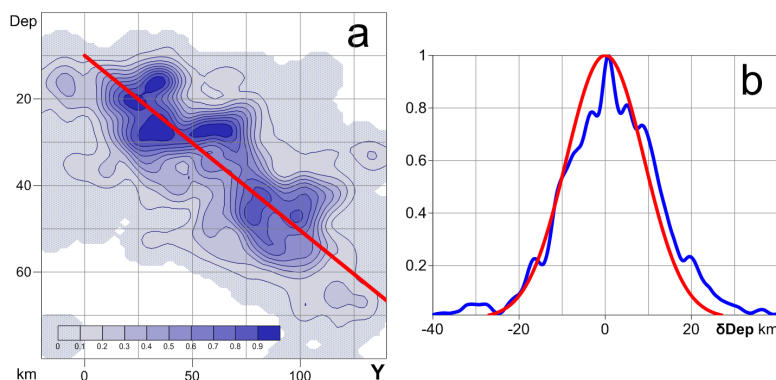


Рис.3. Построение распределения для генерирования глубины центра модельного очага. Синим цветом показаны соответствующие осям сглаженные гистограммы параметров обучающей выборки. Красным цветом полученные распределения: **a** - тренд средних значений, **b** - нормированное на максимум распределение случайной поправки к тренду. Пояснения в тексте.

Очаги цунамигенных землетрясений имеют значительные конечные размеры. При этом, как показывают известные облака афтершоков, очаги в основном не выходят за пределы сейсмофокальной зоны. Поэтому желательно, чтобы почти весь модельный очаг располагался внутри выбранной области. Это накладывает ограничения на положения центров. Причем эти ограничения зависят от магнитуды (и, следовательно, размера очага) события. При фиксированной магнитуде вдоль границ области строятся "запрещенные полосы" шириной в половину длины или ширины проекции на поверхность

эпицентр уже сгенерирован. Камчатская сейсмофокальная зона полого погружается от желоба в северо-западном направлении (в цилиндрической проекции вдоль оси Y). В ортогональном направлении (X) глубины центров не обнаруживают устойчивых трендов. Поэтому мы вырабатываем глубины модельных очагов в рамках предположения, что их центры в координатах (X,Y,Z) в среднем лежат на некоторой (оцениваемой) плоскости, а отклонения от нее подчиняются единому для всей области вероятностному распределению с отсутствием корреляций между точками. Тогда все землетрясения обучающей

выборки можно снести на один вертикальный разрез (параллельный оси Y) и оценить линейный тренд и распределение отклонений от него.

На рис.3.5a приведена нормированная сглаженная двумерная гистограмма событий обучающей выборки, построенная в координатах (Y, Dep). По этой гистограмме проведена линия линейного тренда, вокруг которой группируются события. Она достигает поверхности приблизительно в районе глубоководного желоба и имеет наклон 22°. На рис. 3.5b приведена гистограмма отклонений глубин центроидов реальных событий от построенной линии тренда, а также аппроксимирующая ее плотность гауссова распределения с нулевым средним и среднеквадратичным отклонением 9 км.

Глубина **Dep** центроида модельного очага получается путем вычисления по формуле $\text{Dep} = \text{Tdep}(Y) + \delta\text{Dep}$, где Y - выработанная прежде координата центроида, **Tdep(Y)** - значение на линии тренда, **δDep** - величина поправки, генерируемой датчиком случайных чисел с плотностью гауссова распределения, соответствующей красной кривой на рис. 3.5b.

Распределение азимута простирации плоскости разрыва (Strike)

Камчатский желоб и зона субдукции постепенно меняют свое простираие, медленно разворачиваясь, при движении на север, против часовой стрелки. Этот разворот отражается и в соответствующем изменении преимущественных простираий плоскостей разрыва в очагах землетрясений.

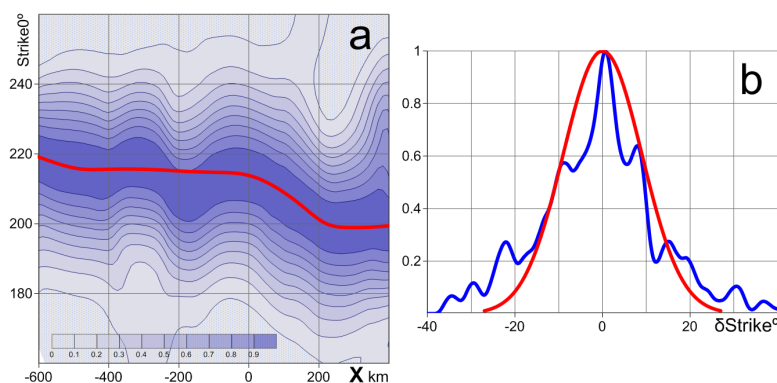


Рис.4. Построение распределения для генерирования простираия разрыва в механизме модельного очага. Обозначения аналогичны рис.3. В гистограмме а каждое сечение, параллельное оси Strike нормировано на частный максимум. Пояснения в тексте.

получается путем вычисления по формуле $\text{Strike} = \text{Tstrike}(X) + \delta\text{Strike}$, где X - выработанная прежде координата центроида, **Tstrike(X)** - значение на линии тренда, приведенной на рис.4a, **δStrike** - величина поправки, генерируемой датчиком случайных чисел с плотностью гауссова распределения, соответствующей красной кривой на рис.4b.

Угол падения плоскости разрыва (Dip)

Сильнейшие землетрясения происходят на больших участках поверхности, разделяющей погружающуюся Тихоокеанскую плиту от висячего крыла зоны субдукции. В отличие от этого часто считается, что более слабые события преимущественно фиксируют относительно небольшие окаймляющие разрывы, возникающие в теле погружающей океанической плиты. Это подтверждается распределениями параметра Dip в механизмах очагов обучающей выборки, которая в основном состоит из событий с магнитудами не превышающими 6.5. Характерные значения углов падения в разрывах землетрясений примерно на 10° превышают средний наклон сейсмофокальной зоны 22°, полученный выше. Следовательно, наблюдаемый разброс параметра Dip для слабых событий не отражает аналогичных параметров сильнейших землетрясений. Поэтому, а также, учитывая, что крупные очаги охватывают по ширине почти всю пологую часть сейсмофокальной зоны, в настоящей версии синтетического каталога данный параметр был зафиксирован и выбрано значение **Dip = 22°**, следующее из полученного выше среднего наклона сейсмофокальной зоны.

Распределение направления подвижки (Rake)

Как и в случае параметра Strike небольшой постепенный разворот желоба и зоны субдукции приводит к появлению тренда в распределении параметра Rake. Непосредственной причиной его

На рис.4a приведена двумерная гистограмма (X, Strike0), где Strike0 - параметр простираия в механизме землетрясения обучающей выборки. По этой гистограмме проведена линия тренда, проинтерполированная кубическим сплайном. На рис.4b приведена гистограмма отклонений Strike0 реальных землетрясений от построенной линии тренда, а также аппроксимирующая ее плотность гауссова распределения со среднеквадратичным отклонением 9°.

Простираие **Strike** разрыва в механизме модельного очага

изменения является то, что на севере Камчатской зоны субдукция происходит не вполне ортогонально границе плит. Это приводит к появлению в механизмах землетрясений заметной лево-сдвиговой компоненты.

На рис.5а приведена двумерная гистограмма событий обучающей выборки, построенная в координатах (X, Rake). По этой гистограмме проведена линия тренда, проинтерполированная кубическим сплайном. На рис.5б приведена гистограмма отклонений параметра Rake механизмов реальных землетрясений от построенной линии тренда, а также аппроксимирующая ее плотность гауссова распределения с нулевым средним и среднеквадратичным отклонением 10°.

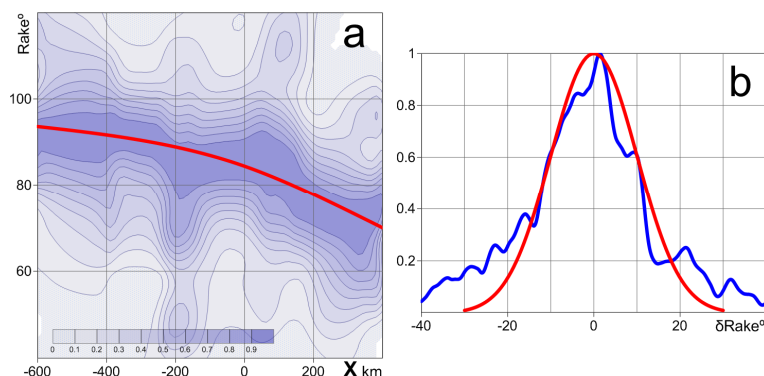


Рис.5. Построение распределения для генерирования направления подвижки в механизме модельного очага. Обозначения аналогичны рис.3. В гистограмме а каждое сечение, параллельное оси Rake нормировано на частный максимум. Пояснения в тексте.

получается путем вычисления по формуле $\text{Rake} = \text{Trake}(X) + \delta\text{Rake}$, где X - выработанная прежде координата центроида, $\text{Trake}(X)$ - значение на линия тренда, приведенной на рис.5а, δRake - величина поправки, генерируемой датчиком случайных чисел с плотностью гауссова распределения, соответствующей красной кривой на рис.5б.

Компьютерная программа

Все приведенные выше распределения реализованы в компьютерной программе "*random_quakes_upper_slab*", которая позволяет сформировать синтетический сейсмологический каталог произвольной длины и обладающий необходимыми статистическими свойствами. В каталоге представлены все параметры последовательных модельных землетрясений, необходимые для расчета порождаемых ими волн цунами. В представленной версии программа при каждом запуске выдает каталог с фиксированной магнитудой событий. Но при последовательном запуске можно использовать произвольный набор магнитуд. На рис.2 представлен (в цилиндрической проекции) пример графического представления очагов случайного синтетического каталога, полученного в результате нескольких запусков программы с различными входными магнитудами. Результаты могут быть представлены также в обычной географической проекции.

Работа проведена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-00407 (рук. Т. Пинегина) и в рамках госзадания АААА-А19-119011490129-0 "Развитие методов анализа сейсмических данных в целях изучения очага, среды, сейсмической опасности".

Список литературы

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1. М.: Мир, 1983. 520 с.
2. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов КФ ФИЦ ЕГС РАН. – URL: <http://emsd.ru/sdis/info/earthquakes/catalogue.php>
3. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология, 2013, № 1, с. 41–64.
4. Global CMT catalog. – URL: <http://www.globalcmt.org/>
5. Kanamori H. & Anderson D.C. 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073-1096.
6. Papazachos B.C., Scordilis E.M., Panagiotopoulos D.G., Papazachos C.B. and Karakaisis G.F. Global Relations Between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes // Bulletin of the Geological Society of Greece vol.XXXVI, 2004, pp. 1482-1489.