

УДК 550.34

РАСШИРЕНИЕ МОДЕЛИ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОГО КАСКАДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕЖИМА ПОВТОРЯЕМОСТИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

© 2015 г. М.В. Родкин¹, Нго Тхи Лыг², Л.М. Лабунцова³

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия*

² *Геофизический институт Академии наук и технологий Вьетнама, г. Ханой, Вьетнам*

³ *Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия*

Известно, что обычный закон повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера может быть смоделирован в рамках схемы мультипликативного каскада, когда сейсмический режим трактуется как последовательность большого числа эпизодов лавинообразной релаксации, случайным образом реализующихся на множестве метастабильных подсистем. Было показано, что подобная модель позволяет имитировать и такие закономерности сейсмического режима, как уменьшение наклона графика повторяемости в окрестности сильных землетрясений, развитие афтершокового степенного каскада и предвестниковой активизации, существование сейсмического цикла. Предлагается расширение схемы каскада добавлением нелинейных членов в кинетическое уравнение каскада с целью описания эффектов “загиба вниз” графика повторяемости землетрясений и возможности возникновения характеристических землетрясений. Результаты моделирования сопоставляются с данными по сейсмичности Юго-Восточной Азии; обсуждаются условия возникновения характеристических землетрясений.

Ключевые слова: статистика сейсмического режима, модель мультипликативного каскада, “загиб вниз” графика повторяемости, характеристические землетрясения.

Введение

Сейсмический режим часто трактуют как пример модели реализации самоорганизующейся критичности (SOC). В рамках этой модели [Bak et al., 1988; Turcotte, 1999; Sornette, 2000; Соболев, Пономарев, 2003; и др.] предполагается, что сейсмический режим самопроизвольно эволюционирует к критическому состоянию. Реализация характерных для сейсмичности степенных законов трактуется в рамках модели SOC по аналогии с критическими явлениями. Однако эта аналогия довольно условна. Как известно, критические явления (в частности, фазовые переходы второго рода) протекают без выделения или поглощения энергии, что и является их фундаментальной особенностью, определяющей закономерности критического поведения. Напротив, при землетрясениях, особенно сильных, происходит огромное выделение энергии. Из сказанного следует, что интерпретация режима сейсмичности в рамках модели SOC не является вполне удовлетворительной; следовательно, представляется актуальной разработка других подходов к интерпретации сейсмического процесса.

Для статистического описания сейсмического процесса часто используется эпидемическая модель ETAS¹ [Ogata, 1988, 1989; и др.], объединяющая закон повторяемости Гутенберга–Рихтера и обобщенный закон Омори.

¹Аббревиатура от Epidemic Type Aftershocks-Sequences.

Разными авторами были исследованы взаимосвязи между значениями параметров модели ETAS и продемонстрирована полезность этой модели для описания вариабельности текущих значений сейсмической опасности [Gasperini, Lolli, 2006; Faenza et al., 2009]. Модель ETAS носит, однако, чисто статистический характер, и уточнение значений её параметров и взаимной коррелированности некоторых из них не позволяет существенно продвинуться в понимании физики сейсмического процесса. Реализация характерных для сейсмического режима степенных законов распределения с общих физических позиций трактуется в работах [Григорян, 1988; Golytsyn, 2001].

Наиболее естественными и важными физическими свойствами геофизической среды, тесно связанными с процессом сейсмичности, по-видимому, являются её иерархичность и термодинамическая неравновесность протекающих в ней процессов. В связи с этим перспективной представляется модель мультипликативного каскада [Родкин, 2011], описывающая статистические свойства сейсмического режима в терминах, характеризующих активность протекающих в среде неравновесных процессов, характеристик памяти среды и коэффициента иерархичности среды, в которой реализуется данный сейсмический процесс. В рамках этой модели сейсмический режим трактуется как последовательность большого числа эпизодов лавинообразной релаксации, случайным образом реализующихся на множестве метастабильных подсистем. Модель позволяет имитировать такие известные эмпирические закономерности сейсмического режима, как закон повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера, уменьшение наклона графика повторяемости в окрестности сильных землетрясений, развитие афтершокового каскада и существование предвестниковой активизации и сейсмического цикла [Родкин, 2011].

В данной работе предлагается развитие модели мультипликативного каскада с целью описания хвоста функции распределения землетрясений (описание области редких сильнейших событий). Сильнейшие землетрясения редки и традиционно рассматриваются как независимые события. Поэтому в данной статье память системы, учет которой позволил описать степенной закон Омори, форшоковую активность и наличие сейсмического цикла [Родкин, 2011], рассматриваться не будет. Будут моделироваться эффект “загиба вниз” графика повторяемости землетрясений и возможность реализации режима так называемых характеристических (отскакивающих) землетрясений. В качестве характеристических нами рассматриваются сильные землетрясения, реализовавшиеся с большей вероятностью, чем это следует из степенного распределения для основной массы надежно определяемых событий слабой и умеренной силы. Возможность описания этих двух эффектов достигается добавлением в кинетическое уравнение мультипликативного каскада нелинейных членов высшего порядка (квадратичного, кубического и четвертой степени). Результаты моделирования сравниваются с данными каталога землетрясений Юго-Восточной Азии. На основании этого сравнения предполагается, что нелинейные положительные связи, обеспечивающие возникновение характеристических землетрясений, физически сопряжены с нелинейностями, порождаемыми более активным глубинным флюидным режимом зон субдукции.

Исходная модель линейного мультипликативного каскада

Сначала кратко напомним основные положения простейшего линейного варианта схемы мультипликативного каскада. Опишем эту модель в терминах рекуррентных соотношений; несколько более длинное описание для непрерывного случая приводится в [Rodkin et al., 2008]. Пусть начавшееся произвольное событие (землетрясение) величиной (энергией, сейсмическим моментом) X_i в некоторый момент времени t_i может продолжить свое развитие с вероятностью p или прекратиться с вероятностью $(1-p)$.

В случае прекращения процесса на i -м шаге величина землетрясения полагается равной достигнутому к этому шагу значению X_i . В случае продолжения процесса релаксации метастабильной подсистемы положим, что величина события X_{i+1} в следующий момент времени t_{i+1} возрастает до значения

$$X_{i+1} = r \cdot X_i, \quad (1)$$

где $r > 1$ параметр (в общем случае случайный со средним значением, бóльшим 1). Начальное (на первом шаге) значение величины землетрясения положим равным X_0 . Отметим, что такая схема хорошо отвечает распространенным представлениям о процессе землетрясения с переходом по мере развития на всё более высокие масштабные (иерархические) уровни.

В схеме (1) вероятность прерывания процесса на n -й стадии и получения значения $X = X_0 r^n$ равна $(1-p) \cdot p^n$. Отсюда получаем, что хвост функции распределения $F(X_n > X)$ описывается соотношением $(1-F(X)) = p^{\lg(X)/\lg(r)}$, и, таким образом, имеем

$$\lg(1-F(X)) = \lg(p)/\lg(r) \cdot \lg(X), \quad (2)$$

т.е. получаем степенную зависимость для хвоста функции распределения $(1-F(X))$. При постоянной величине r на выходе процедуры (1) получаем дискретное иерархическое распределение величин землетрясений. С ростом случайного разброса значений r ступенчатый характер модельных распределений сглаживается, и в пределе получаем распределение, аналогичное обычному графику повторяемости событий (землетрясений) в координатах $\{\lg(X), \lg(N)\}$. Наклон графика повторяемости в двойных логарифмических координатах $\{\lg(X), \lg(N)\}$ равен $\beta = \lg(1/p)/\lg(r)$, где параметр β имеет смысл, аналогичный наклону графика повторяемости землетрясений в законе Гутенберга–Рихтера (для величин энергии или сейсмического момента землетрясений).

Несложно подобрать значения параметров r и p так, чтобы получаемые значения наклона графика повторяемости и величины X отвечали типичным значениям для закона повторяемости величин сейсмического момента. Магнитуды модельных событий M введем по аналогии с введением магнитуды M_w в работе [Hanks, Kanamori, 1979] –

$$M_w = 2/3 \lg(X) - 16.1. \quad (3)$$

Такой выбор параметров модели не носит принципиального характера, а используется исключительно для удобства сопоставления модели с сейсмическими данными.

Если задать некое среднее число лавинообразных процессов за единицу времени N и некоторый закон небольших изменений от времени параметров r и/или p , то модель даст последовательность магнитуд основных (независимых) событий $\{M\}$, сходную с таковой для магнитуд землетрясений в реальном сейсмическом процессе. Даже такая – предельно простая – модель оказывается содержательной. Она продуцирует [Rodkin, Gvishiani, Labuntsova, 2008; Родкин, 2011] известный “прогнозный” признак – интервалам времени возникновения сильных землетрясений отвечают (в среднем) пониженные значения наклона графика повторяемости β ; эта связь имеет вероятностный характер.

Реализации больших значений магнитуд статистически отвечают значения параметров модели p и r , соответствующие также и меньшим значениям наклона графика повторяемости. Естественный вариант задания памяти системы, затухающей со временем не медленнее чем $1/t$ [Родкин, 2011], позволил описать закон Омори для афтершокового каскада, эффект предвестниковой активизации и возникновение сейсмического цикла.

Такое расширение, однако, лежит вне тематики данной статьи, посвященной анализу режима сильнейших землетрясений, которые являются редкими и считаются

в сейсмологии независимыми, в связи с чем учет памяти системы не требуется (по крайней мере, в первом приближении).

Модель нелинейного мультипликативного каскада

Линейной модели мультипликативного каскада (1)–(2) присущи те же некорректности, что и классическому закону повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера. Действительно, среднее значение сейсмической энергии (сейсмического момента) для закона повторяемости Гутенберга–Рихтера (с типичным значением наклона графика повторяемости) оказывается бесконечным. В этом случае источник энергии сейсмического процесса должен был бы иметь бесконечную мощность. Такой характер поведения представляется физически неоправданным, из чего следует, что закон Гутенберга–Рихтера не может выполняться для сколь угодно редких сильных землетрясений. Закон повторяемости землетрясений должен включать или некое максимально возможное событие, или некоторым образом видоизмениться, чтобы среднее значение выделяемой энергии (сейсмического момента) стало уже конечным. Оба эти варианта решения широко используются в сейсмологии. В практике оценки сейсмической опасности обычно вводится значение M_{\max} , ограничивающее справа область выполнения закона Гутенберга–Рихтера. Оценки величин M_{\max} – важнейшие характеристики схем сейсмического районирования, однако определение этого параметра вызывает затруднения логического характера и потому не является вполне удовлетворительным [Писаренко, Родкин, 2007; Писаренко и др., 2014; Pisarenko, Rodkin, 2013].

Логически более оправданным представляется вариант решения проблемы, приводимый в [Kagan, 1999], где в функцию распределения землетрясений (закон Гутенберга–Рихтера) вводится экспоненциальный множитель, который начинает сказываться только в области сильных событий и обеспечивает конечность среднего значения выделенной сейсмической энергии (сейсмического момента). В этой работе утверждается, что такой закон повторяемости величин сейсмического момента практически универсален (кроме, возможно, зон срединно-океанических хребтов) и сейсмичность разных регионов отличается только интенсивностью потока числа событий в единицу времени.

Закону распределения числа сильнейших землетрясений, обеспечивающему конечность источника сейсмической энергии, отвечает известный эффект “загиба вниз” графика повторяемости.

Другая методика описания хвоста функции распределения представлена в [Писаренко, Родкин, 2007; Писаренко и др., 2014; Pisarenko, Rodkin, 2013], где суммируются результаты исследований поведения хвоста функции распределения в рамках теории экстремальных значений. Авторами показано, что в подавляющем большинстве случаев поведение хвоста функции распределения описывается конечным распределением. Только в случае рассмотрения временного интервала, включающего оба мегаземлетрясения ($M > 9$) начала нашего века – Андаманское и Тохоку, – параметры эмпирического распределения близки к безлимитному экспоненциальному закону распределения.

Полученный результат представляется вполне ожидаемым. Действительно, все реально оцениваемые количества являются конечными; отсюда можно предположить, что и описывающие их законы распределения также должны быть конечными. Невыполнение условия конечности модельного закона распределения обычно указывает на малый размер анализируемой выборки, недостаточный для описания должным образом статистики повторяемости редких сильнейших событий.

Приведенные результаты исследования хвоста эмпирических функций распределения, типичность проявления эффекта “загиба вниз” графика повторяемости землетрясений, наконец, требование конечности мощности источника сейсмической энергии указывают на необходимость модернизации уравнения (1) мультипликативного каскада. Определяющее “загиб вниз” графика повторяемости усложнение мультипликативного каскада удобно задать в виде

$$X_{i+1} = r \cdot X_i - r_2 \cdot (X_i / A_2)^2, \quad (4)$$

где $r_2, A_2 > 0$. Параметр A_2 при этом как бы задает уровень событий, начиная с которого возникает эффект загиба, а параметр r_2 регулирует скорость изменений поведения графика.

Кроме эффекта “загиба вниз” графика повторяемости землетрясений в сейсмологии часто рассматривается возможность реализации так называемых характеристических землетрясений – аномально сильных событий, реализующихся существенно чаще, чем это следовало бы ожидать, исходя из уравнения Гутенберга–Рихтера. Режим с возникновением характеристических землетрясений естественно задать путем добавления в соотношение (4) положительного кубического члена. После такого добавления, однако, снова возникает проблема конечности мощности источника сейсмической энергии. Для удовлетворения этого условия в уравнение следует добавить отрицательное слагаемое более высокой (скажем, четвертой) степени по X . Отсюда получаем финальное нелинейное соотношение, позволяющее смоделировать и эффект “загиба вниз” графика повторяемости землетрясений, и возможность возникновения характеристических землетрясений:

$$X_{i+1} = r \cdot X_i - r_2 \cdot (X_i / A_2)^2 + r_3 \cdot (X_i / A_3)^3 - r_4 \cdot (X_i / A_4)^4. \quad (5)$$

В соотношении (5) естественно принять $A_4 \gg A_3 \gg A_2$; все коэффициенты в (5) полагаются неотрицательными. При сравнимых по порядку величины значениях параметров r по мере роста силы событий (величины X) сначала будет реализовываться загиб графика повторяемости вниз, затем будет располагаться область доминирующего развития характеристических землетрясений, после чего возникает новый (окончательный) “загиб вниз” графика повторяемости. В этом случае модельный график повторяемости будет качественно аналогичен предполагаемому для случая реализации характеристических землетрясений.

Вообще говоря, стадию первого “загиба вниз” графика повторяемости можно сократить и рассматривать усеченный вариант соотношения (5) степени не выше третьей. Мы решили, однако, этого не делать, так как вариант реализации характеристических землетрясений реализуется, по-видимому, относительно редко, а условие конечности мощности источника сейсмической энергии должно выполняться всегда.

Естественно, соотношения (4) и (5), так же как уже отмечалось ранее для соотношения (1), могут быть заданы не в форме рекуррентных соотношений, а для непрерывного случая в виде нелинейных дифференциальных уравнений.

Сопоставление характера графиков повторяемости землетрясений для разных регионов Юго-Восточной Азии

Нами были рассмотрены без пропусков все события с $M > 5$, зарегистрированные в Юго-Восточной Азии с начала 1964 г. по апрель 2013 г. Схема распределения очагов землетрясений по данным регионального каталога [Ngo Thi Lu et al., 2008; Нго Тху Лы, 2011] представлена на рис. 1. По сейсмичности исследуемый регион может быть разделен на шесть зон, характеризующихся резко повышенной плотностью землетрясений.

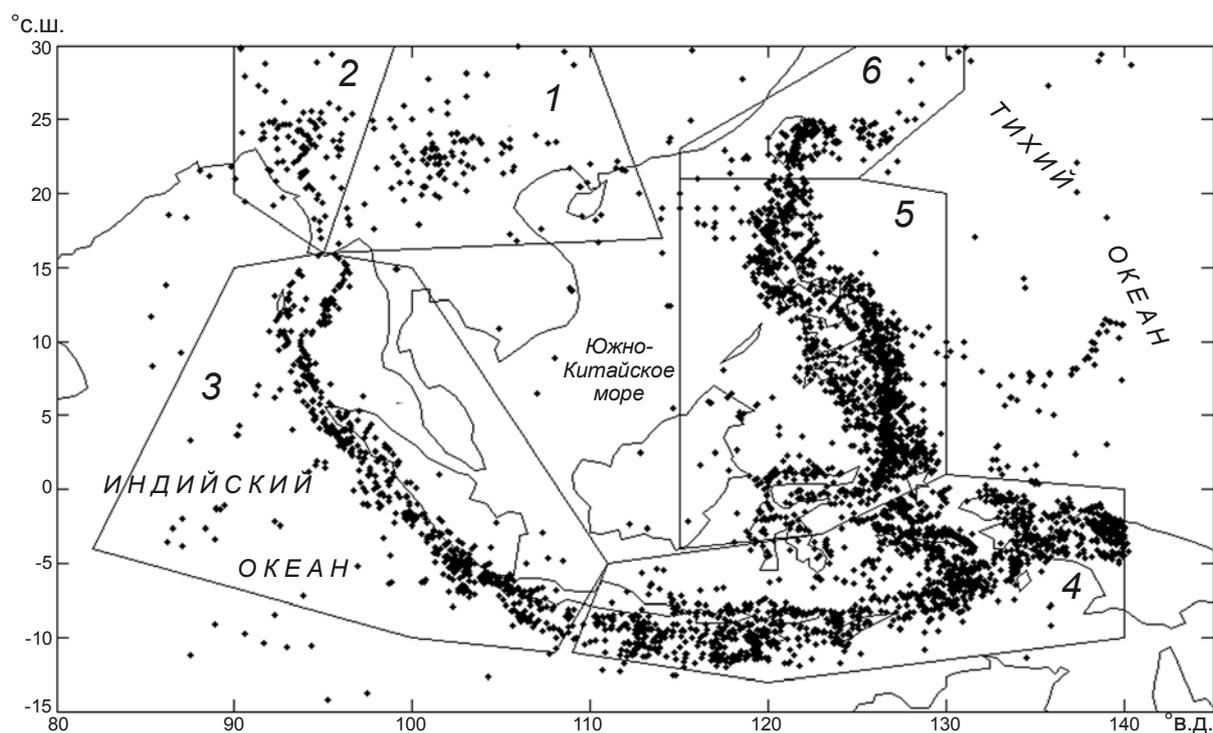


Рис. 1. Схема распределения очагов землетрясений на территории Юго-Восточной Азии с границами зон разной сейсмичности. 1–6 – номера рассматриваемых зон. Точки – эпицентры землетрясений с $M > 5$ за 1964–2013 гг.

Зоны 1, 2 отвечают внутриконтинентальным областям, 3–6 – разным участкам зон субдукции; параметры сейсмичности каждой из зон приведены в таблице.

Параметры сейсмичности зон 1–6

Зона	Число событий	Ориентировочное число характеристических событий
1	204	0
2	115	0
3	2408	8
4	3032	5
5	3970	25
6	769	8

Графики повторяемости для внутриконтинентальных районов и для участков зон субдукции приведены на рис. 2. Характер графиков для двух континентальных областей и участков зон субдукции в нашем случае существенно различен. Для континентальных областей (зоны 1, 2, рис. 2, а) вполне отчетливо прослеживается эффект “загиба вниз” графика повторяемости при отсутствии признаков реализации экстремально сильных (отскакивающих) характеристических событий. Для всех участков зон субдукции (зоны 3–6, рис. 2, б, в), напротив, более или менее определенно выявляются максимальные по силе характеристические землетрясения.

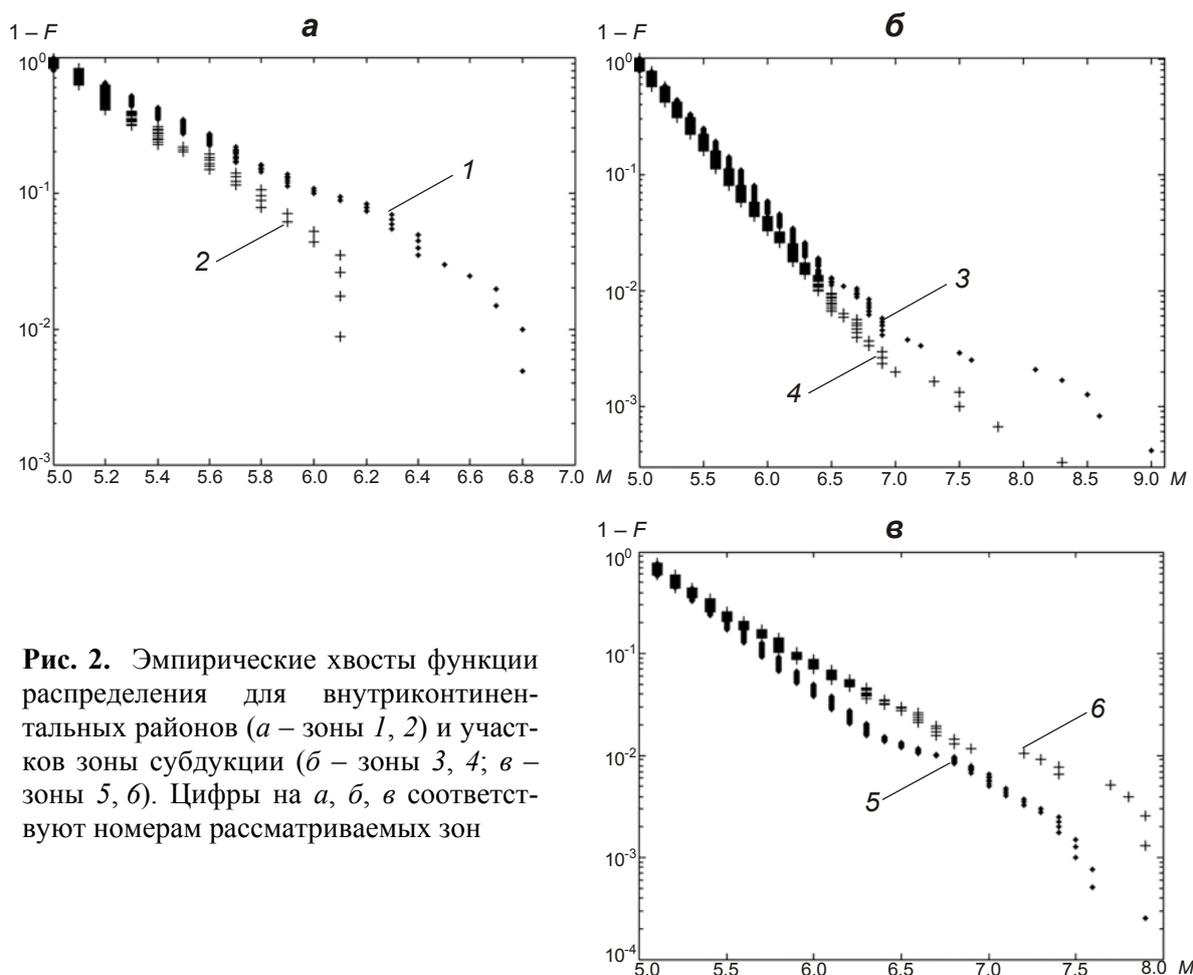


Рис. 2. Эмпирические хвосты функции распределения для внутриконтинентальных районов (*а* – зоны 1, 2) и участков зоны субдукции (*б* – зоны 3, 4; *в* – зоны 5, 6). Цифры на *а*, *б*, *в* соответствуют номерам рассматриваемых зон

Естественно, реализация на данном временном интервале редкого отскакивающего характеристического землетрясения – сугубо случайный процесс. Однако определенная систематичность, когда все отскакивающие землетрясения наблюдаются именно в областях зон субдукции, дает основания рассмотреть не только формальную модель описания различий в поведении хвоста функции распределения в терминах схем (4) для континентальных районов и (5) – для районов зон субдукции, но также и обсудить возможные физические причины такого различия.

Обсуждение

Отметим, прежде всего, что проблема “загиба вниз” графика повторяемости землетрясений и проблема возможности реализации отскакивающих характеристических землетрясений принципиально важны для решения задачи сейсмического районирования. Значительный интерес представляет и задача физической интерпретации разнообразия, наблюдаемого в характере распределения сильнейших сейсмических событий в разных регионах мира.

Исходно авторы собирались провести оценку сейсмической опасности региона Юго-Восточной Азии на основании региональных сейсмических каталогов землетрясений [Nго Thi Lu et al., 2008; Нго Тху Лы, 2011] и разработанной ранее методики расчета сейсмической опасности на основе использования предельных распределений теории

экстремальных значений [Писаренко, Родкин, 2007, 2014; Pisarenko, Rodkin, 2010, 2013; и др.]. Реализация этой программы расчетов оказалась, однако, заблокированной специфическим поведением хвоста функции распределения – вероятным развитием характеристических землетрясений – в подрегионах зон субдукции в Юго-Восточной Азии (рис. 2, б, в). Расчеты на основе теории предельных распределений экстремальных значений дают максимально полную и робастную оценку в том случае, если эмпирическое распределение сильнейших событий (скажем 50–100 сильнейших землетрясений) отвечает некоторому единому закону распределения. Это, однако, не так в том случае, когда имеется малое число, скажем, 3–10 отскакивающих событий. В этом случае метод не обеспечивает робастную оценку квантилей высокого порядка (вероятности реализации сильнейших событий). Условия применимости метода будут выполняться снова при накоплении требуемого минимального числа характеристических событий, скажем, 30–50. Но такое условие, как видно из рис. 2, заведомо не реализуется. Во всех субрегионах число возможных характеристических землетрясений заведомо меньше названного требуемого нижнего предела.

Если существование характеристических землетрясений в используемом каталоге (в выборке данных) достаточно обосновано сейсмическими данными, но их количество заведомо недостаточно для получения робастных оценок вероятности сильнейших событий, то более строгие методы оценки сейсмической опасности на основе применения предельных распределений теории экстремальных значений [Писаренко, Родкин, 2007, 2014; Pisarenko, Rodkin, 2010, 2013] неприменимы. В этом случае приходится обращаться к более простым методам оценки, которые основываются обычно на исходно задаваемом виде функции распределения. В данном случае это должна быть довольно сложная функция, учитывающая возможность возникновения характеристических землетрясений. Отметим, что именно такой подход использовался, например, при расчете комплекта карт ОСР-2012 [Уломов, Богданов, 2013]. При разработке таких типовых функций распределения может оказаться полезным моделирование режима возникновения характеристических землетрясений в рамках представленной выше нелинейной схемы мультипликативного каскада.

Обратимся теперь к обсуждению возможных физических причин разнообразия в характере распределения сильнейших сейсмических событий в разных регионах. В этой связи подчеркнём, что в Юго-Восточной Азии все проявления отскакивающих характеристических землетрясений оказались локализованными в пределах зон субдукции. Естественно, это может оказаться случайным совпадением. Этот эффект может быть связан с тем, что в зонах субдукции реализуется большее число землетрясений, и, соответственно, в них более высока вероятность реализации редких сильнейших характеристических землетрясений. Во внутриплитных обстановках для реализации характеристических землетрясений может потребоваться большее время.

Но возможно и альтернативное объяснение. Из схемы мультипликативного каскада (5) видно, что условием возникновения отскакивающих характеристических землетрясений является возникновение положительных нелинейных обратных связей между размером и скоростью роста сейсмического события. Физически такие дополнительные положительные обратные связи должны быть, по-видимому, связаны с наличием в очаговой области дополнительных агентов неустойчивости. Применительно к зонам субдукции таким агентом может оказаться повышенная активность флюидного режима и большая концентрация флюидной фазы. Значительный рост концентрации флюидной фазы (до порядка величины) и большая активность флюидного режима действительно характерны для зон субдукции.

Заключение

Сейсмический режим обычно принято трактовать в рамках концепции самоорганизующейся критичности (SOC), предполагающей самопроизвольную эволюцию динамической системы к критическому состоянию. Однако для случая сейсмичности механизма такой эволюции предложено не было. Не было предложено и объяснения в рамках SOC-концепции различия сейсмоактивных и практически асейсмичных областей. Указанными проблемами не исчерпываются трудности, возникающие при интерпретации сейсмического режима в рамках SOC. В этой модели широко используется аналогия между сейсмическим режимом и фазовыми переходами II рода. Однако принципиальной особенностью фазовых переходов II рода является то, что превращение осуществляется без поглощения (выделения) энергии. Процессам же землетрясений отвечает взрывообразное выделение значительной энергии.

В данной статье продолжено развитие альтернативной модели сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, реализующихся на множестве метастабильных подсистем. Идея лавинообразности процесса развития землетрясений далеко не нова. Достаточно сослаться на название известной ЛНТ (лавинно-неустойчивого трещинообразования) модели подготовки землетрясения [Мячкин и др., 1975]. Среди более поздних отметим работу [Соболев, 2010], где развитие очага землетрясения трактуется как процесс последовательного разрушения метастабильных зон.

Ключевыми параметрами предлагаемой модели геофизической среды являются параметр пространственной иерархичности среды r , во многом аналогичный параметру иерархичности по М.А.Садовскому [Дискретные..., 1989]), и параметр p , характеризующий степень метастабильности среды (вероятность продолжения процесса лавинообразной релаксации метастабильных подсистем). Такая модель при дополнительном учете памяти среды позволила описать не только закон повторяемости землетрясений Гутенберга–Рихтера, но и закон Омори, а также существование форшоковой активизации и сейсмического цикла [Родкин, 2011].

В настоящей работе рассмотрено расширение схемы каскада добавлением нелинейных членов в кинетическое уравнение каскада с целью описания эффектов “загиба вниз” графика повторяемости землетрясений и возможности возникновения характеристических землетрясений. Возможность возникновения характеристических землетрясений связана в модели с возникновением нелинейных положительных связей между текущей величиной зоны сейсмической подвижки (или иной подобной характеристики) и скоростью роста области подвижки. Результаты моделирования сопоставляются с данными по сейсмичности Юго-Восточной Азии. В этом регионе довольно значительное число характеристических землетрясений оказалось приуроченным исключительно к зонам субдукции. Поскольку в данной модели возможность возникновения характеристических землетрясений обеспечивается наличием нелинейной положительной обратной связи, то можно говорить и о её приуроченности к зонам субдукции. Возможно, такая приуроченность связана с повышенной активностью флюидного режима в зонах.

Отметим, что предложенное расширение схемы линейного мультипликативного каскада (4) может иметь применение не только в сейсмологии. Ранее [Rodkin, Gvishiani, Labuntsova, 2008] эта схема была использована для интерпретации степенного распределения числа месторождений (рудных и УВ) в зависимости от объема запасов. В работе [Родкин, Шатахьян, 2013] показано, что для ряда видов рудного сырья отмечается эффект “загиба вниз” степенного закона распределения, аналогичный “загибу вниз” графика Гутенберга–Рихтера. На основании этого можно предположить применимость схемы (4) для интерпретации подобных случаев.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-00776).

Литература

- Григорян С.С. О механизме генерации землетрясений и смысле эмпирических сейсмических соотношений // Докл. АН СССР. 1988. Т. 299, № 6. С.1094–1101.
- Дискретные свойства геофизической среды / Отв. ред. М.А. Садовский. М.: Наука, 1989. 176 с.
- Нго Тхи Лы Оценка сейсмологического потенциала территории Вьетнама по комбинации геологических геофизических и сейсмических данных // Проект международного научного сотрудничества по Соглашению между Вьетнамской академией наук и технологий и Российской академией наук (2008–2010). Ханой, 2011. Сводный отчет. 163 с.
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. С.6–29.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычислительная сейсмология. Вып. 38. М.: ГЕОС, 2007. 240 с.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Рукавишников Т.А. Оценка вероятности сильнейших сейсмических катастроф на основе теории экстремальных значений // Физика Земли. 2014. № 3. С.89–103.
- Родкин М.В. Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных состояний // Физика Земли. 2011. № 10. С.18–26.
- Родкин М.В., Шатахиян А.Р. Статистический анализ данных по крупным и суперкрупным месторождениям: эмпирические закономерности и интерпретация // Геоинформатика. 2013. № 4. С.25–32.
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии // Экстремальные природные явления и катастрофы. В 2-х т. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. М.: ИФЗ РАН, 2010. С.15–43.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Уломов В.И., Богданов М.И. Новый комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012) // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С.30–39.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organised criticality // Phys. Rev. A. 1988. V. 38. P.364–374.
- Faenza L., Hainzl S., Scherbaum F. Statistical analysis of the Central-Europe seismicity // Tectonophysics. 2009. V. 470. P.195–204.
- Gasperini P., Lolli B. Correlation between the parameters of the aftershock rate equation: Implications for the forecasting of future sequences // Phys. Earth Planet. Inter. 2006. V. 156. P.41–58.
- Golitsyn G.S. The place of the Gutenberg–Richter law among other statistical laws of nature // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. М.: Наука, 2001. С.138–161. (Вычисл. сейсмология; Вып. 32).
- Kagan Y.Y. Universality of the seismic moment-frequency relation // Pure Appl. Geophys. 1999. V. 1. P.537–573.
- Ngo Thi Lu, Gatinsky Y.G., Kondorskaia N.V. Seismicity and modern geokinematics of Southeast part of Asia // Reports of the Russian Acad. of Sci. 2000. V. 347, N 7. P.247–251. (in Russian).
- Ogata Y. Statistical models for earthquake occurrence and residual analysis for point processes // J. Am. Stat. Assoc. 1988. V. 83. P.9–27.
- Ogata Y. Space–time point-process models for earthquake occurrence // Ann. Inst. Statist. Math. 1998. V. 50. P.379–402.
- Pisarenko V., Rodkin M. Heavy-Tailed Distributions in Disaster Analysis // Advances in Natural and Technological Hazards Research. V. 30. Dordrecht; Heidelberg; London; New York: Springer, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-9171-0.
- Pisarenko V., Rodkin M. Statistical Analysis of Natural Disasters and Related Losses // Springer Briefs in Earth Sciences. Dordrecht; Heidelberg; London; New York: Springer, 2013. 89 p. ISBN: 978-3-319-01453-1.

Rodkin M.V., Gvishiani A.D., Labuntsova L.M. Models of generation of power laws of distribution in the processes of seismicity and in formation of oil fields and ore deposits // Russian Journal of Earth Sciences. 2008. V. 10, N 5. ES5004. doi: 10.2205/2007ES000282.

Sornette D. Critical Phenomena in Natural Sciences. Berlin: Springer, 2000. 450 p.

Turcotte D.L. Seismicity and self-organized criticality // Phys. Earth Planet. Inter. 1999. V. 111. P.275–293.

Сведения об авторах

РОДКИН Михаил Владимирович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел.: 8(495) 333-34-01. E-mail: rodkin@mitp.ru

Нго Тхи Лы – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт геофизики Академии наук и технологий Вьетнама. Ханой, Хоанг Куок Вьет, А8-18, Вьетнам. E-mail: ngothilu@yahoo.com; ngothiluiqp@gmail.com

ЛАБУНЦОВА Людмила Михайловна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Геофизический центр РАН. 119297, Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: 8 (495) 930-05-46. E-mail: l.labuntsova@gcras.ru

EXTENSION OF MULTIPLICATIVE CASCADE MODEL FOR DESCRIPTIONS OF FREQUENCY REGIME OF STRONG EARTHQUAKES: APPLICATION TO REGIONAL SEISMICITY OF SOUTHEAST ASIA

M.V. Rodkin¹, Ngo Thi Lu², L.M. Labuntsova³

¹ International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow, Russia

² Institute of Geophysics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

³ Geophysical Center RAS, Moscow, Russia

Abstract. It is known that the ordinary Gutenberg–Richter law of earthquake recurrence can be modeled within the scheme of multiplicative cascade in which the seismic regime is treated as a sequence of a large number of episodes of avalanche-like relaxation, randomly occurring on the set of metastable subsystems. It is shown that this model can simulate such well known regularities in the seismic regime as a decrease in b-value in connection with the strong earthquakes occurrence, Omori law of aftershock number decay, the existence of the foreshock activity and the seismic cycle. We propose here the extension of the schema by adding of nonlinear terms in the kinetic equation of the multiplicative cascade to describe the effect of “bending down” of the graph of strong earthquake recurrence and the possibility of occurrence of characteristic earthquakes. The results are compared with data on seismicity of the Southeast Asia and the physical conditions of occurrence of characteristic earthquakes are discussed.

Keywords: earthquake statistics, multiplicative cascade model, bend down of the distribution law of earthquakes, characteristic earthquakes.