УДК 550.34

НОВЫЙ ЗАКОН СЕЙСМОЛОГИИ?

Родкин М.В. [1,2]

[1] *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*
[2] *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, rodkin@mitp.ru*

Введение

Исследование предвестниковых аномалий затруднено сильной случайной компонентой сейсмического процесса, приводящей к огромному разнообразию режимов развития отдельных фор- и афтершоковых последовательностей. В отдельной такой последовательности часто оказывается затруднительно выделить типовые черты фор- и афтершокового процесса. Вариабельность разных последовательностей столь велика, что даже породила представления об отсутствии таких общих черт фор- и афтершокового процесса как форшоковая активизация и реализация афтершокового процесса по закону Омори [4].

С целью подтверждения существования и уточнения типовых черт фор- и афтершокового процесса был предложен и реализован метод [1, 3, 10, 11] построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ), в котором, в результате масштабируемой агрегации в общую фор-афтершоковую последовательность данных по очень большому числу отдельных фор- и афтершоковых последовательностей удается надежно выделить типовые их свойства. От подобных работ других авторов метод построения ООСЗ отличается большим (до 1000) числом объединяемых фор- и афтершоковых последовательностей и использованием масштабирования при наложении событий по пространству.

В ООСЗ четко видны форшоковая степенная активизация и афтершоковый процесс, протекающий согласно закону Омори-Утсу. Кроме того, для значительного числа параметров (величин наклона графика повторяемости, средней глубины землетрясений, величин кажущихся напряжений σ_a, ряда других характеристик) выявляется единообразная по характеру аномалия с амплитудой, нарастающей как минус логарифм времени от момента обобщенного сильного события (ОСЗ). Причем такой характер аномалии (чаще с разными значениями параметров и разной длительностью аномалии) наблюдается и в форшоковой, и в афтершоковой области. Такая устойчиво повторяющаяся и характерная по форме аномалия может быть предположительно охарактеризована как некая новая эмпирическая закономерность сейсмического режима. Данная статья посвящена обсуждению и интерпретации этой закономерности.

Методика исследований и результаты

Вопросы методики построения ООСЗ подробно обсуждались в работах [1, 3, 10, 11], здесь опишем метод построения ООСЗ более сжато. При построении ООСЗ отбираются события, попавшие в окрестность одного из большого числа (несколько сотен, до 1000) сильнейших землетрясений из данного каталога. Опыт показывает, что построение ООСЗ для совокупности 100 и менее сильнейших событий обычно дает еще довольно сильные флуктуации, и общие тенденции изменения исследуемых параметров оказываются замаскированными. Под окрестностью понимаются события, происшедшие от очага данного главного сильного события на расстоянии не более n размеров очага R главного события. Число размеров n обычно принимается равным 3 или 5 (были опробованы и другие варианты). Уменьшению n отвечает более резкое проявление аномалии, но меньшая статистика, большим значениям n – большая статистика, но и большая “замусоренность” обобщенной окрестности событиями, не связанными с данным сильным землетрясением. Рассмотрение особенностей режима для разных n позволяет выявить как бы “тень” активизации – когда рост событий для малых n сопровождается уменьшением активности на больших n [10]. Выбор значения n обычно является неким компромиссом. В данной работе использовано значение $n = 5$.

Для расчетов размера очага R (в километрах) в зависимости от магнитуды нами использовалась или формула [6], где вид магнитуды и ориентация очага не конкретизированы:

$$R = 10^{0.5\times M - 1.9}, \tag{1a}$$

Или более детализированные соотношения [12], где даны типичные размеры очага вдоль его длинной полуоси (1b) и среднего радиуса очага (1c) и конкретизирована магнитуда:

$$R = 10^{0.59\times Mw - 2.44}, \quad (1б)$$
$$R = 10^{0.45\times Mw - 1.7}. \quad (1в)$$

В нашей задаче более оправданным представляется использование соотношений (1а) или (1в), так как данные по ориентировке очага в каталогах землетрясений отсутствуют. Приводимые ниже результаты рассчитаны для варианта (1а); использование разных формул для расчета R не меняет принципиальным образом характер выявляемых и обсуждаемых далее закономерностей.

При выборе временной окрестности используется стандартный метод наложения эпох, такой простой подход представляется оправданным, ввиду того, что в работе [7] было показано, что длительность подготовки разрушения (сейсмического цикла) слабо зависит от магнитуды события; тем более это должно быть несущественно в нашем случае, когда отбираются события близких (больших) магнитуд.

В данной статье использован каталог *GCMT*. В предыдущих работах использовались также каталоги *USGS/NEIC* и *JMA*, результаты для всех каталогов качественно аналогичны. В данной работе, как более статистически представительные и практически значимые, рассматриваются события с глубиной $H \leq 70$ км. Каталог *GCMT* с 1976 г. по январь 2016 г. содержит 44 603 события, при использовании ограничения $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ км остается 15 723 таких событий, в рамках этого ограничения каталог может трактоваться как удовлетворительно полный (возможно кроме области развития ранних наиболее многочисленных афтершоков). В данной работе рассмотрена окрестность, собранная из окрестностей 500 сильнейших событий.

Наиболее часто анализируемой и используемой характеристикой сейсмического режима является значение наклона графика повторяемости *b-value*, которое может быть оценено по формуле

$$b\text{-}value = \lg(e) / (\mathrm{mean}(M) - M_c). \quad (2)$$

В соотношении (2) mean(M) – среднее значение магнитуды; $M_c = 5.4$ – граничное значение. Из (2) видно, что величина (и аномалия) *b-value* фактически определяется средним значением магнитуды. Отсюда можно рассматривать более физически прозрачную величину mean(M). На рис. 1а, 1б видно, что для близкой к моменту ОСЗ области четко выделяется аномалия роста величины *mean(M)* как abs (минус логарифм времени до момента ОСЗ), для краткости, назовем эту аномалию *МЛТ* аномалией.

$$mean(M) = a + b \lg|\Delta t|, \quad (3)$$

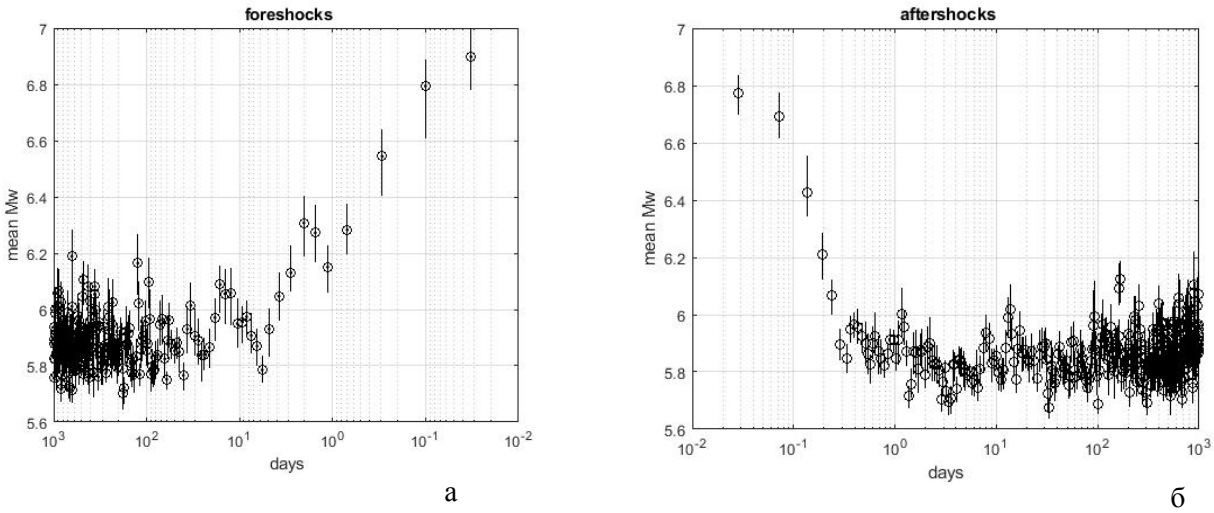
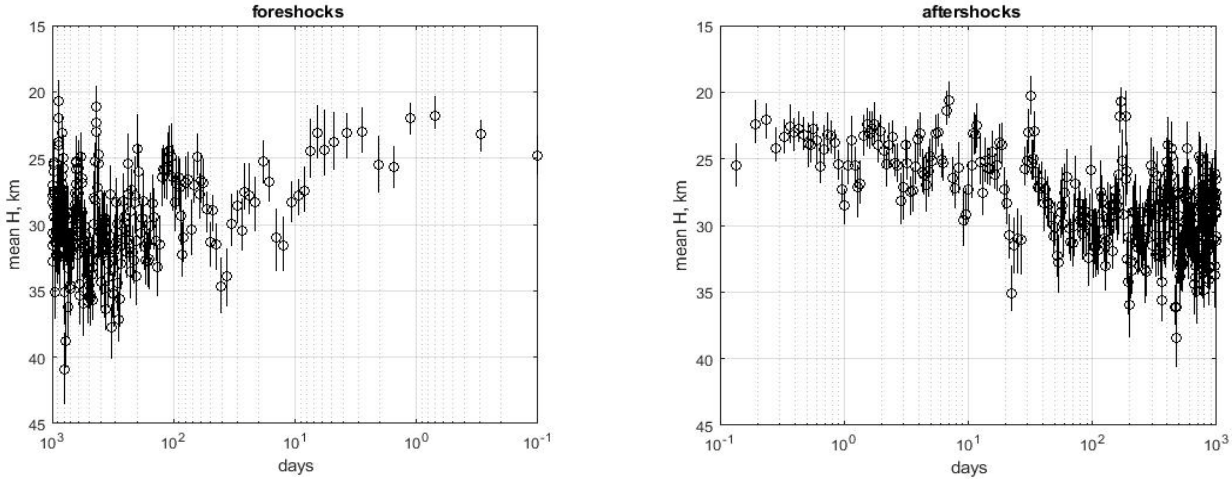


Рис. 1. Средняя магнитуда землетрясений ($M_w \geq 5.4$) в ООСЗ, форшоки (а) и афтершоки (б), *GCMT* каталог. Оценка погрешности получена численным бутстреп-методом

Соотношение типа *МЛТ* аномалии (3) оказалось весьма типично, оно выявляется при рассмотрении таких различных параметров как *b-value*, mean(M), mean(Mb-Mw), величин кажущихся напряжений, продолжительности очагового процесса, величины согласованности ориентации

механизмов очага отдельных фор- и афтершоков с механизмом главного события и даже для изменения средней глубины форшоков (рис. 2). Отметим, что зависимости типа (3) обычно лучше выполняются в форшоковой области, а для афтершоков часто наблюдается различие в режиме ранних и более поздних афтершоков. Естественно, не все аномалии независимы, некоторые являются следствием изменения среднего значения магнитуды.



а б

Рис. 2. Изменения средней глубины событий в ООСЗ в логарифмической шкале по оси времени для форшоков (а) и афтершоков (б), каталог *GCMT*

Среди независимых аномалий особый интерес представляет аномалия уменьшения средней глубины землетрясений. Отметим, что аномалия «всплывания афтершоков» ранее уже отмечалась другими авторами. В ООСЗ она проявляется вполне четко и может быть описана соотношением типа (3). Природа этой аномалии по-видимому связана с ростом трещиноватости и проницаемости среды в окрестности очага развивающегося сильного землетрясения, и с прорывом легкого флюида вверх.

Обсуждение

Наиболее ожидаема была бы интерпретация *МЛТ* аномалии типа (3) в рамках модели самоорганизующейся критичности (*SOC*). Однако для модели *SOC* и, более широко, для критических процессов характерны степенные соотношения. Связь между величиной аномалии и расстоянием от критической точки (например, от величины $\Delta T = (T–Tc)/Tc$, где T – текущая температура, а Tc – критическая температура) имеет вид

$$\Psi = \alpha\,(\Delta T)^{\gamma}. \qquad (4)$$

Степенной характер соотношения (4) хорошо отвечает степенному режиму фор- и афтершокового каскадов числа землетрясений, но радикально отличается от соотношения (3). Учитывая, что магнитуда является линейной функцией от логарифма энергии, некоторые из перечисленных выше *МЛТ* аномалий предположительно могут быть проинтерпретированы в рамках модели *SOC*. Это, однако, заведомо затруднительно для аномалий уменьшения средней глубины землетрясений и роста однородности поля сейсмогенных деформаций. Отсюда получаем, что в рамках концепции критических процессов возможность интерпретации *МЛТ* аномалии достаточна гипотетична.

Рассогласование соотношений (4) и (5) можно трактовать как дополнительное свидетельство ограниченной возможности интерпретации сейсмических процессов как примера критических явлений. Этот вывод не нов. Как известно, механизмов реализации *SOC* применительно к сейсмическому процессу предложено не было. При этом обращалось внимание на принципиальное различие критических явлений и процесса сейсмичности. Если в критических процессах потенциалы старой и новой фазы полагаются равными, и превращение не предполагает выделение или поглощение энергии, то землетрясения сопровождаются огромным выделением энергии, что собственно и обуславливает их опасность.

В работах [2, 9 и др.] в качестве возможной альтернативы модели *SOC* была предложена модель сейсмического режима как последовательности большого числа эпизодов лавинообразной релаксации, случайным образом реализующихся на множестве метастабильных подсистем. Процесс развития отдельного землетрясения моделировался при этом мультипликативным каскадом, описывающим лавинообразный процесс релаксации метастабильного состояния. Модель мультипликативного каскада (*ММК*) в линейном приближении описывает закон Гутенберга-Рихтера и тенденцию уменьшения величин наклона графика повторяемости в связи с возникновения сильных землетрясений [2, 9]. При усложнении модели добавлением памяти системы модель имитирует также закон Омори, эффект роевой сейсмичности, предвестниковую активизацию и режим сейсмического цикла [2]. В логически необходимой (обеспечивающей финитность описываемого процесса) нелинейной модификации модель позволяет описать возникновение характеристических землетрясений и “загиб вниз” графика повторяемости землетрясений в области сильных событий [8]. Таким образом, в рамках *ММК* модели можно воспроизвести все надежно установленные закономерности сейсмического процесса. При этом, в отличии от чисто статистической модели *ETAS*, модель *ММК* описывает сейсмический режим в физических терминах. Для удобства читателя ниже кратко описаны основные моменты *ММК* модели в простейшем линейном варианте модели без памяти, достаточном, однако, для интерпретации *МЛТ* аномалии.

Пусть начавшееся произвольное событие (землетрясение) величиной (энергией) X_i в некоторый момент времени t_i с вероятностью p может продолжить свое развитие или завершиться с вероятностью $(1 - p)$. В случае прекращения процесса на i-ом шаге величина события полагается равной достигнутому на этом шаге значению X_i. В случае продолжения процесса релаксации метастабильной подсистемы положим, что величина события X_{i+1} в $(i+1)$ момент времени возрастет до значения

$$X_{i+1} = r \times X_i, \tag{5}$$

где $r > 1$ – коэффициент иерархичности (в общем случае случайный), со средним значением $r > 1$; учитывая положения блоково-иерархической концепции М.А. Садовского, естественно положить значения $r \approx 3$ [5]). Такая схема отвечает модели развития землетрясения, с переходом на все более высокие масштабные (иерархические) уровни. Начальное (на первом шаге) значение величины землетрясения, без ограничения общности, положим равным X_0.

В схеме (5) вероятность прерывания процесса на n-й стадии и получения значения $X = X_0 \times r^n$ равна $(1 - p) \times p^n$. Отсюда получаем, что хвост функции распределения $F(X_n > X)$ описывается соотношением: $(1 - F(X)) = p^{\log(X)/\log(r)}$. Отсюда имеем

$$\log(1 - F(X)) = \log(p)/\log(r) \times \log(X) \tag{6}$$

степенную зависимость для хвоста функции распределения $(1 - F(X))$. При постоянной величине r модель дает дискретно-иерархическое распределение величин событий. С увеличением случайного разброса r ступенчатый характер модельного распределения сглаживается, и при большом разбросе получаем распределение с прямолинейным графиком повторяемости величин событий (землетрясений) в координатах $\{\log(X), \log(N)\}$. Наклон графика повторяемости в двойных лог-координатах $\{\log(X), \log(N)\}$ при этом равен

$$\beta = \log(1/p)/\log(r), \tag{7}$$

где параметр β имеет смысл, аналогичный наклону графика повторяемости землетрясений в законе Гутенберга-Рихтера (для величин X энергии или сейсмического момента землетрясений). В рамках дальнейшего использования ММК модели резонно положить, что коэффициент иерархичности r характеризует строение геофизической среды, а вероятность продолжения развития очага p характеризует степень неравновесности протекающего в среде процесса (величину напряженного состояния, активность флюидного режима). Учитывая это, будем далее называть r параметром иерархичности, а параметр p параметром неустойчивости. Сравнивая теперь выражения (3) и (7) видим, что характер аномалии у них аналогичный – логарифмический. Росту вероятности p продолжения процесса сейсмического вспарывания ($p \to 1$) отвечает уменьшение времени до главного события $\Delta t \to 0$; происходит рост амплитуды аномалии и резкое уменьшение величин наклона графика повторяемости β.

Заключение

По данным анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения для большого числа характеристик сейсмического процесса показано существование типовой фор- и афтершоковой аномалии вида $a + b\ lg|\Delta t|$, где Δt – интервал времени до момента обобщенного главного события. Продолжительности фор- и афтершоковой аномалии и, естественно, параметры a и b могут различаться. Аномалия указанного типа выделяется для таких характеристик сейсмического режима как величина наклона графика повторяемости, средняя магнитуда землетрясений, средняя глубина землетрясений, отношение значений магнитуд *Mb/Mw* и ряда иных характеристик. Естественно предположить, что лишь часть из этих аномалий являются независимыми. Статус этой новой эмпирической закономерности можно предполагать аналогичным закону Омори.

Одна из перечисленных выше аномалий – уменьшение средней глубины землетрясений в близкой окрестности обобщенного главного события представляется связанной с наличием в очаговой зоне флюида малой плотности (не расплава), лавинообразным развитием трещиноватости, и прорывом флюида в область меньших давлений.

Обсуждается интерпретация выявленной аномалии, которая дается в терминах модели мультипликативного каскада и отвечает параллельному с уменьшением времени до главного события росту вероятности продолжения развития этого ранее начавшегося сейсмического процесса (росту вероятности перехода его на более высокие иерархические уровни). Обсуждена возможность интерпретации, выявленной *МЛТ* аномалии в рамках *SOC* концепции. Возможность такой интерпретации оказывается весьма ограниченной, что возможно отражает ограниченность возможности интерпретации сейсмического процесса в рамках *SOC* модели.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 19-05-00466.

Список литературы

1. *Родкин М.В.* Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 66–77.
2. *Родкин М.В.* Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных состояний // Физика Земли. 2011. № 10. С. 18–26.
3. *Родкин М.В., Рундквист Д.В.* Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Изд-во “Интеллект”, 2017. 288 с.
4. *Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г.* Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000 // Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32. С. 162–189.
5. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* О свойстве дискретности горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3–19.
6. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
7. *Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // Физика Земли. 2004. № 10. С. 26–36.
8. *Шерман С.И., Родкин М.В., Горбунова Е.А.* Тектонофизический анализ типов графиков повторяемости катастрофических землетрясений Центральной Азии // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 47–60.
9. *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. No. 5. P.
10. *Rodkin M.V.* Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development, in Extreme Events and Natural Hazards // The Complexity Perspective. Geophys. Monogr. Ser. / Eds A. S. Sharma et al. AGU, Washington, D.C. 2012. V. 196. P. 27–39. doi: 10.1029/2011GM001060.
11. *Rodkin M.V., Tikhonov I.N.* The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016. V. 95. P. 73–84.
12. *Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // BSSA. 1994. V. 84. No. 4. P. 974–1002.