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 р 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.