

**ПРЕДВЕСТНИКИ ИЛИ СОПУТСТВУЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА?
PRECURSOR PHENOMENA OR ACCOMPANYING CHANGE IN THE SEISMIC REGIME?**

Родкин М.В., Рукавишникова Т.А.,

ГЦ РАН, rodkin@wdcb.ru МИТП РАН, tanyar@mitp.ru

On the basis of results of the analysis of variability of parameters of the seismic regime in the generalized vicinity of strong earthquake and of the used models of a seismic regime the question what are the so-called precursors of strong earthquakes is discussed. It is possible, that precursors correspond to some process of preparation of a strong earthquake. But it is possible also, that such process of strong earthquake preparation does not exist, and a set of precursors reflect the distinctions in the seismic regime, corresponding to greater and smaller probability of a casual occurrence of strong earthquake. Different models of the seismic regime support both such interpretations. The substantial and not trivial forecasting of strong earthquake is possible in both these cases, but theoretically admissible accuracy of the prognosis will be very different. Results of the analysis of variability of parameters of a seismic regime in the generalized vicinity of strong earthquake can be treated in terms of both these approaches also, but the existence of the precursor foreshock power-law cascade of seismic activity supports mostly the existence of a process of preparation of a strong earthquake.

Ключевыми эмпирическими закономерностями, описывающими сейсмический режим, являются закон Гутенберга-Рихтера распределения числа землетрясений в зависимости от их магнитуды и степенной закон спада числа афтершоков от времени Омори. Аналоги этих степенных распределений (как известно, закон Гутенберга-Рихтера при его перезаписи для величин сейсмической энергии или сейсмического моменты принимает степенной характер) были выявлены впоследствии также и в других природных процессах. Отсюда естественным образом возникла проблема объяснения такого рода закономерностей.

До недавнего времени основное внимание уделялось объяснению степенного закона Гутенберга-Рихтера. На настоящий момент наиболее распространенная трактовка степенного распределения Гутенберга-Рихтера отвечает концепции самосогласованной критичности (SOC-conception). Согласно этой концепции, различные по своей природе динамические системы имеют тенденцию самопроизвольной эволюции в сторону развития режима самосогласованной критичности. Однако достаточно общего, адекватного широкому развитию степенных распределений в природе, описания такого процесса самопроизвольной эволюции к критическому состоянию предложено не было. Существующие сценарии развития режима самосогласованной критичности [1 и др.] достаточной общностью не обладают. Разными авторами предлагались также альтернативные трактовки распространенности в природе случаев реализации степенных распределений, в частности были даны объяснения возникновения закона Гутенберга-Рихтера [2, 3 и др.]. Все упомянутые подходы были направлены, однако, на объяснение степенного закона Гутенберга-Рихтера, предположительно связанному с ним закону Омори уделялось меньше внимания.

Сравнительно недавно [4-6] получили развитие также статистические модели сейсмического режима, нацеленные на описание как закона Гутенберга-Рихтера, так и закона Омори и модифицированного закона Омори [7]. Наибольшее распространение получила модель эпидемического режима последовательности землетрясений (ETAS-model), позволившая в первом приближении в рамках единого подхода описать и режим основных событий, и режим форшоков и афтершоков. В рамках модели ETAS, каждое реализующееся землетрясение магнитудой M (и основные события и форшоки) вызывает реализацию некоего среднего суммарного числа событий $N \sim \exp(aM)$, где a некий параметр. Распределение землетрясений по магнитудам полагается отвечающим закону Гутенберга-Рихтера. В модели реализуются аналоги фор- и афтершоковой активизации, а также эффект кластеризации основных событий (main shocks). Более того, эта модель - в связи с ростом вероятности нового землетрясения после возникновения данного текущего землетрясения - позволяет реализовать статистически нетривиальный (значимо отличающийся от случайного угадывания) прогноз землетрясений. Более детальный анализ выявил, однако, что модель ETAS не вполне точно описывает режим долгосрочной кластеризации землетрясений [6]. Другим недостатком этого подхода является его чисто статистическая формулировка, в связи с чем на его основе не удастся продвинуться в физическом понимании сейсмического процесса.

Далее рассматривается модель сейсмического режима как некоторой последовательности эпизодов лавинообразной релаксации, протекающей на некоторой совокупности метастабильных

подсистем. Эта модель была предложена в [8, 9], где было показано, что в рамках этой модели удастся описать не только закон повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера, но с известную статистическую закономерность приуроченности моментов реализации сильных землетрясений к интервалам времени пониженных значений наклона графиков повторяемости.

В рамках этого подхода [8] реализация степенного распределения обеспечивается протеканием совокупности эпизодов развития стохастических лавинообразных процессов, когда скорость нарастания процесса статистически пропорциональна его текущему значению

$$dx/dt = a x, \quad (1)$$

где a – случайная величина с положительным средним значением, а лавинообразный процесс (1) на каждом последующем шаге (в единицу времени) с вероятностью p может продолжиться или прерваться с вероятностью $(1-p)$. Легко показать, что получаемая в результате серии эпизодов (1) совокупность величин X_i оказывается распределенной по степенному закону. Действительно, величины отдельных событий x , реализующихся в результате n шагов процесса равны:

$$x = x_0 \exp(an\Delta t), \quad (2)$$

где x_0 – начальное значение, n – номер шага, Δt – длина шага по времени. Вероятность прерывания развития процесса на n шаге и образования события величиной x равна

$$P(t = n\Delta t) = (1-p) p^n. \quad (3)$$

Отсюда имеем

$$P(x_0 \exp(an\Delta t) \geq x) = p^n, \quad (4)$$

где произведено суммирование бесконечной геометрической прогрессии: $(1-p) p^n + (1-p) p^{n+1} + \dots + (1-p) p^\infty$. Из (4) получаем

$$\ln\{P(x_0 \exp(an\Delta t) \geq x)\} = \ln(1-F(x)) = \ln(p)/(a\Delta t) \times \ln(x/x_0). \quad (5)$$

Аналогичным образом, в случае непрерывного процесса, который может прерваться с равной вероятностью в произвольный момент времени, вероятность p продолжения развития процесса на шаге произвольной длины Δt может быть записана как $p_0^{\Delta t}$, где p_0 – вероятность продолжения развития процесса для шага единичной продолжительности. Учитывая это, из (5) получаем

$$\ln(1-F(x)) = \ln(p_0)/a \times \ln(x/x_0) \quad (6)$$

Из (5) и (6) видно, что модель (1) приводит к степенному распределению числа событий от их размера x .

Сейсмический процесс можно представить как совокупность эпизодов лавинообразной релаксации ранее накопленной упругой энергии (или внутренней энергии горных пород, например, энергии метастабильных минеральных фаз). Характеристики такой модели – интенсивность потока событий в единицу времени N и два параметра – средние значения параметра k и вероятности прекращения лавинообразного процесса в единицу времени p . Параметры k и p по отдельности не определяются, но в совокупности задают значение наклона графика повторяемости b (b -value) значений X_i (величин энергии или сейсмического момента землетрясений)

$$b = \ln(1/p)/\ln(1+a). \quad (7)$$

Нетрудно подобрать в (7) такие значения параметров a и p , при которых получаемые значения наклона графика повторяемости β и магнитуды m (например, величин $\lg(X_i)$) соответствуют типичным для сейсмического процесса значениям. В частности, если положить начальные значения X_i равными единице, а средние значения $p=0.5$ и $a=1$, то получим типичное значение наклона графика повторяемости $b=1$.

Если задать некое среднее число N таких лавинообразных процессов за единицу времени и некоторый закон изменения от времени параметров a и p , то модель (1)-(7) описывает последовательность значений модельных магнитуд событий $\lg(X_i)$, сходную с таковой для магнитуд землетрясений в реальном сейсмическом процессе. При этом изменения параметров a и p будут отвечать изменениям с (модельным) временем величин наклона графика повторяемости. Одновременно с этим будет изменяться и вероятность реализации больших значений X_i . Можно показать что такая простая модель продуцирует хорошо известный прогнозный признак – моментам возникновения сильных землетрясений M_{max} предшествуют, в среднем, пониженные значения наклона графика повторяемости b .

На рис.1 представлен результат типичного модельного расчета, сопоставлены полученные значения максимальных магнитуд $M_{max}=\lg(X_i)$ и величин наклона графика повторяемости b за предшествующий (интервалу времени для определения M_{max}) интервал

(модельного) времени. Как видно на рис.1, эти параметры оказываются сильно коррелированными – максимальные события реализуются (статистически) при относительно меньших значениях наклона графика повторяемости. Механизм возникновения такой корреляции вполне ясен – реализации больших значений магнитуд статистически отвечают значения параметров модели p и a , соответствующие одновременно также и меньшим значениям наклона графика повторяемости.

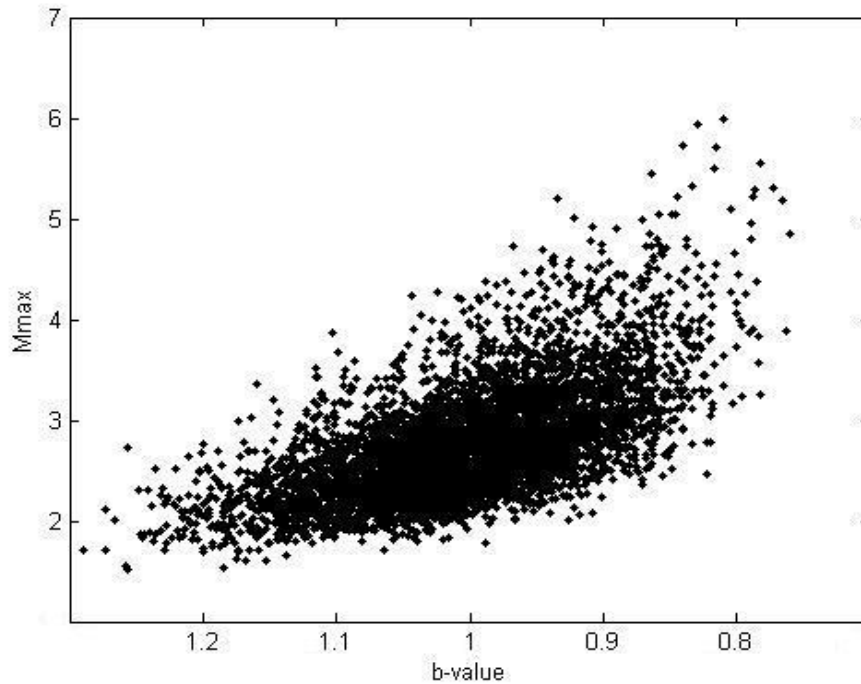


Рис.1. Модельное соотношение между наклонами графика повторяемости b и максимальной реализовавшейся магнитудой M_{max} за последующие интервалы времени. Видна повышенная вероятность реализации сильного события в интервалы времени, которым предшествовали пониженные значения наклона графика повторяемости b -value.

Подчеркнем, что в обсуждаемой модели тенденция уменьшения наклона графика повторяемости b это не прогнозный признак «готовящегося» сильного события, так как неправомерно говорить о подготовке чего-либо применительно к последовательности независимых событий. В данном случае значения параметра b корреляционно связаны с увеличением вероятности возникновения сильного события. Такая аномалия статистически присуща некоторому интервалу времени как до, так и после момента сильного события. Интерпретируя полученный результат применительно к проблеме прогноза сильных модельных землетрясений, получаем, что статистически значимый прогноз возникновения сильного события возможен, но этот прогноз носит сугубо вероятностный характер. Каждое отдельное события является случайным явлением.

Аналогичная связь возможна и для реального сейсмического режима. Практически полезный прогноз при этом также был бы возможен, но в ином, чем это обычно понимается, смысле. Оказывается возможным указать интервалы времени повышенной вероятности возникновения сильного землетрясения, но при этом физический «процесс подготовки сильного землетрясения», как таковой, отсутствует.

В описанном выше простейшем варианте модели (1)-(7) последовательные события («землетрясения») являются независимыми событиями. Ввиду этого, этот вариант модели не описывает ни кластеризации землетрясений, ни эффектов фор- и афтершоковой активности. Соответственно, этот вариант модели намного менее содержателен и интересен, нежели модель ETAS. Этот недостаток, однако, можно исправить. Довольно естественно, например, предположить и ввести в модель, что интенсивность потока событий не является (как это предполагалось выше) Пуассоновским процессом с фиксированным средним значением, но зависит от предыдущих состояний системы. Естественно предположить, например, что текущая интенсивность потока событий зависит от разницы выделенной ранее энергии землетрясений и среднего по времени выделения энергии. Достаточно естественно задать также, что это воздействие линейно уменьшается со временем. Уже при таких простых и естественных

предположениях в модели удастся смоделировать развитие афтершоковых последовательностей, близких по своим свойствам к реально наблюдаемым. Отметим, что при этом в модели возникает также и слабая форшоковая активизация. Эта форшоковая активизация проявляется двояко. С одной стороны, в достаточно широкой окрестности сильных событий (как до, так и после) наблюдаются слабая активизация и уменьшение наклона графика повторяемости. С другой, непосредственно перед сильным землетрясением, наблюдается слабый рост сейсмической активности к моменту события. Эти особенности аналогичны выявляемым в реальном сейсмическом процессе [10], хотя предваряющая модельная активизация и оказывается, видимо, еще слабее наблюдаемой в природе.

Сравним теперь представленную модель (1)-(7) и модель ETAS. Легко видеть, что полученный в рамках модели (1)-(7) результат по статистической прогнозируемости землетрясений в значительной степени аналогичен упомянутому выше и используемому для текущего анализа сейсмической опасности в Калифорнии методу прогноза землетрясений на основе модели ETAS. В последнем случае также исследуется некий единообразный во времени стохастический процесс, в котором отсутствуют явные процессы подготовки землетрясений, и вместо этого, по некоторым статистическим соотношениям, изменяется вероятность реализации землетрясений разной магнитуды.

Отметим также, что предложенная модель допускает содержательную физическую интерпретацию, указывая на зависимость сейсмического режима от характера структурированности геофизической среды, описываемого параметром a и от степени метастабильности среды, описываемой параметром p .

Представленная выше модельная ситуация качественно отличается от случая, когда «процесс подготовки сильного землетрясения» реально существует. Действительно, при существовании реального процесса подготовки землетрясения можно выявлять его новые признаки, и при увеличении объема данных и прогресса в его исследовании такой прогноз мог бы становиться все более точным. В рамках же представленной выше модели возможности улучшения качества прогноза изначально ограничены случайным характером реализации любого конкретного землетрясения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-05-92655.

Литература

1. Gaveau B., Moreau M. and Toth J. Scenarios for Self-Organized Criticality in Dynamical Systems. *Open Sys. Information Dyn.* 7: 297–308, 2000
2. Голицын Г.С. Место закона Гутенберга-Рихтера среди других статистических законов природы. //Проблемы динамики литосферы и сейсмичности (Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32, 138-161.
3. Григорян С.С. О механизме генерации землетрясений и смысле эмпирических сейсмических соотношений. *ДАН СССР*, 1988, т.299, №6, 1094-1101.
4. Ogata, Y., 1988. Statistical models for earthquake occurrence and residual analysis for point processes. *J. Am. Stat. Assoc.* 83, 9–27.
5. Cinti, F.R., Faenza, L., Marzocchi, W., Montone, P., 2004. Probability map of the next $M \geq 5.5$ earthquakes in Italy. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 5, Q11003. doi:10.1029/2004GC000724.
6. Faenza, L., Marzocchi, W., Lombardi, A.M., Console, R., 2004. Some insights into the time clustering of large earthquakes in Italy. *Ann. Geophys.* 47 (5), 1635–1640.
7. Utsu, T., 1961. A statistical study of the occurrence of aftershocks. *Geophys. Mag.* 30, 521–605.
8. Родкин М.В. Кумулятивный и мультипликативный каскады как модели типизации и механизмов развития катастроф. *Геоэкология*, 2001, №4, 320-328.
9. Rodkin M. V., Gvishiani A. D., and L. M. Labuntsova. 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.* V. 10, No. 5, June 2008.
10. Родкин М.В. Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения. *Вулканология и сейсмология*, 2008, 1-12, №6.