

УДК 550.343

Н.В. Короновский, А.А. Наймарк

ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ — РЕАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ПЕРСПЕКТИВА ИЛИ ВЫЗОВ НАУКЕ?

Показано, что главная проблема сейсмопрогнозирования — не в трудностях отделения полезного сигнала о подготовке сильного землетрясения от шумов, а в характере сигнала. Он в силу фрактальности и грубой дискретности геологической среды всегда представлен не одной четко обособленной аномалией-предвестником, а множеством аномалий — разноранговых, но не контрастно различающихся, флуктуирующих по амплитуде и длительности. Это при бифуркационности и чрезвычайной зависимости поведения нелинейных геосистем от начальных и постоянно перестраивающихся текущих условий объясняет неизбежную ненадежность прогноза наиболее зрелых крупных очагов.

Ключевые слова: аномалия, бифуркация, землетрясение, нелинейность, прогноз, фрактал.

The main problem of earthquake prediction is not difficulties of distinguishing of a useful signal about preparation of strong earthquake from noise, but in character of a signal. Because of fractal self-similar and coarsely-discrete properties of geological medium the signal is not an isolated precursor-anomaly, but always a number of varied-rank wavelets, owing to low-contrast differences not very distinctly recognizable on adjacent ranks and fluctuating at amplitudes and duration inside of ranks. It, owing to bifurcate and extreme dependence of behaviour of nonlinear geodynamic systems at initial and variable current conditions, explains inevitable unreliability of the forecast of the most mature seismic centers.

Key words: anomaly, bifurcation, earthquake, nonlinearity, prediction, fractal.

Введение. “Вызов” — именно так квалифицируют концептуальный рубеж, к которому подошла наука наших дней [Пригожин, Стенгерс, 2000]. Классическая наука полагала возможным, зная в данный момент положение и скорость объекта, устанавливать его положение в прошлом и будущем. Считалось, что объективное, истинное развитие отличается от познаваемого в опыте именно своей предопределенностью, а траектории реального движения должны сходиться к изначально детерминированному пределу. Но, как оказалось, “...движение может стать столь сложным, а траектории столь причудливыми, что никакое сколь угодно точное наблюдение не позволит точно задать начальные условия” [там же, с. 76]. В весьма общем случае предсказуема не отдельная траектория, не средняя в пучке траекторий, а лишь поведение всего пучка в среднем.

Тем не менее наука нередко еще претендует на точность отражения мира, достижимую лишь при неких сверхъестественных возможностях. Но сегодня, когда в науку “...входят случайность, сложность и необратимость, мы отходим от прежнего весьма наивного допущения о существовании прямой связи между нашим описанием мира и самим миром” [там же, с. 58].

Реальность, вполне предсказуемая из начальных условий, как ни заманчива такая перспектива, была бы, по И. Пригожину, всего лишь бесконечным воспроизведением самой себя, не будучи способна

рождать что-либо качественно новое. Допущение подобной предсказуемости и есть вызов современной науке, которая, постигая нелинейность и необратимость мира, развеивает мираж его абсолютной заданности.

Как с этих позиций расценить стремление к надежному и точному прогнозу сейсмичности? Достижимо ли это? Будет ли такой прогноз лишь локальным успехом в рамках существующей парадигмы, окажется ли концептуальным прорывом или останется вызовом науке о нелинейной, бифуркационной, непредсказуемой эволюции мира?

Сейсмопрогнозирование — состояние проблемы. К концу 80-х гг. XX в. стало ясно: сгущение сети наблюдений за аномалиями-предвестниками сейсмических событий не приводит к их четкой локализации в пространстве и во времени. Мозаичность, изменчивость распространения таких аномалий от места к месту, от землетрясения к землетрясению указывает на то, что они не везде и не всегда связаны с будущими сейсмическими очагами. В СССР Спитакское землетрясение ($M = 7,1$; 1988) стало тяжелой (на 3 балла по шкале MSK-64) ошибкой общего сейсмораионирования. В Китае после эффективного (и весьма эффективного) предсказания Хайчэнского катастрофического землетрясения ($M = 7,4$; 1975) новое землетрясение ($M = 7,8$; 1976) спустя всего полтора года уничтожило в том же районе г. Таншань, унеся сотни тысяч жизней. В США землетрясение с $M = 6$ прогнозировалось в 1988 г. на 30-летний период в Паркфилде (штат

Калифорния) с вероятностью 90%, но катастрофа ($M = 7,1$; 1989) произошла на 170 км северо-западнее, где ее вероятность оценивалась в 20–30%. За последние десятилетия в Японии и США не предсказано ни одно из произошедших землетрясений.

Все это породило сомнения в возможности сейсмопрогнозирования. “Землетрясения — пример детерминистского хаоса?” — задавались вопросом Дж. Хуанг и Д. Тёркотт [Huang, Turcotte, 1990]. “Новая модель приводит к выводу о том, что землетрясения случайны”, — отвечали исследователи сейсмичности Калифорнии [New model..., 1993]. “Предсказание землетрясений: грустная история”, — подытоживали 30-летние прогнозные исследования Я. Каган и Д. Джексон [Kagan, Jackson, 1994]. Отметив непредсказуемость землетрясений в последние 50 лет, совещание сейсмологов в Лондоне (1996) весьма пессимистично оценило дальнейшие перспективы их прогноза. Место, время и интенсивность разрушительных землетрясений даже в хорошо изученных регионах всякий раз оказывались и оказываются до сих пор неожиданными. “Землетрясения непредсказуемы”, — заключили Р. Геллер с соавторами [Geller et al., 1997].

Отечественные сейсмологи такой вывод не считают окончательным. “Пусть нет хорошей повторяемости сигналов-предвестников, но все же почему в целом ряде случаев они достоверно наблюдались перед землетрясениями?” [Дещеревский и др., 2003, с. 3]. Убежденность в неслучайности подобных совпадений высказывали А.Д. Завьялов [2006], А.А. Любушин [2007], Г.А. Соболев, А.В. Пономарев [2003] и др. В дискуссии на страницах журнала “Nature” (1999) некоторые сейсмологи и геофизики посчитали проблему предсказания землетрясений нерешаемой, другие же сочли прекращение исследований преждевременным. Необходимыми и достаточными представлялись, как отмечают А.В. Дещеревский и др. [2003], мониторинг геофизических параметров, накопление достаточной статистики их аномальных вариаций в связи с последующими землетрясениями, а затем — решение лишь технических вопросов: установление характерной формы аномалий и алгоритма их выделения на фоне шумов в режиме реального времени. При этом, подчеркивали Г.А. Гусев и И.Л. Гуфельд [2003], предвестниковый характер аномалий обосновывался весьма приблизительным (по времени — от суток до многих лет, по месту — до 1000 км) соответствием сильному землетрясению. Но, несмотря на отдельные примеры удачного прогноза, так и не выявлено ни однозначности в поведении, ни устойчивой повторяемости предвестников перед сильными событиями.

Попытки прогноза по наблюдаемым аномалиям, “похожим” на предшествовавшие другим землетрясениям, заводили проблему в тупик [Гусев, Гуфельд, 2003]. Возмущение любого параметра ретроспективно относили к наиболее сильному землетрясению, даже

если слабое событие в этот период случалось ближе. Между тем использование эмпирических соотношений между временем возмущения, магнитудой события и расстоянием от эпицентра до точки наблюдения имеет смысл, лишь если независимо доказано, что данное возмущение есть именно предвестник конкретного землетрясения. Без этого за предвестник может быть принято возмущение любого параметра среды, а это значит, что в исходные предпосылки закладывается то, что еще требуется доказать.

Причины неудач. Обычно принимают, что землетрясения невозможны без подготовки, а их предвестниками должны быть низкочастотные “бухтообразные” аномалии значений наблюдаемого параметра. Длительность же и интенсивность “бухты” должны зависеть от силы готовящегося землетрясения и эпицентрального расстояния. Однако число успешных прогнозов на такой основе при продолжительных наблюдениях росло незначительно, тогда как “ложные тревоги” и “пропуски цели” множились быстро. Низкочастотные же вариации обнаруживали квазирегулярность, оказываясь, таким образом, ложными предвестниками. Создание все более сложных моделей процесса на основе новейших теорий (перколяции, фракталов, динамического хаоса) не привели к реальным успехам. Не могли быть надежными и экспертные прогнозные заключения, поскольку опыт устойчивого прогноза отсутствовал [Любушин, 2007]. Становилось все яснее, что дело не в недостатке наблюдательных фактов. Аномалии, связанные с подготовкой землетрясения, неотличимы от возмущений иной природы, и фиксация вариаций геофизических полей еще не ведет к прогнозу [Моргунов, 1999; Статива, 1991].

Ныне все чаще подчеркивают бифуркационность, хаотичность сейсмического процесса [Huang, Turcotte, 1990; New model..., 1993; Pavlos et al., 1991], высокую вероятность динамического развития любой малой трещины до крупного сейсмогенного разрыва, чрезвычайную зависимость даже от слабых внешних возмущений, которые могут приводить к неустойчивости обширного сейсмоактивного района, находящегося в метастабильном состоянии [Соболев, Пономарев, 2003]. Земные приливы, удаленные землетрясения, гидрометеофакторы, порождая весьма слабые вариации напряжений, тем не менее действуют как триггеры. Там, где скорость роста напряжений превышает скорость релаксации, породы близки к пределу длительной прочности. По [Bak, Tang, 1989], землетрясения — феномены самоорганизованной критичности. По Г.А. Соболеву и А.В. Пономареву [2003], область метастабильного состояния на порядки превышает объем будущего очага.

Выявляя стадийность сейсмического процесса, измеряя современные движения земной коры, картируя пересечения и изломы молодых разрывов, где концентрируются напряжения, удается установить более или менее надежно лишь местоположения, притом всегда нескольких “кандидатов в очаги”. Уве-

ренно выделить среди них очаг, наиболее созревший для землетрясения, надежно предсказать момент его перехода к состоянию неустойчивости крайне сложно. Повышение напряжений на несколько процентов уменьшает время до потери устойчивости в несколько раз. При этом совместные разнопериодные влияния Луны и Солнца, метеофакторов, землетрясений в соседних районах резко и непредсказуемо меняют время до момента землетрясения. Предвестники часто совпадают не с эпицентром будущего землетрясения, а, например, с пересечением разломами высоконапорных водоносных горизонтов. Неоднозначность связи аномальных вариаций геофизических, гидродинамических, геохимических параметров именно с очагами землетрясений увеличивает на сотни километров область возможного местонахождения очага. Хаотичность сейсмического процесса не позволяет рассчитывать на детерминированный прогноз.

Предвестники в моделях подготовки сейсмического события. Тем не менее аномальное поведение перед землетрясением множества геофизических и геохимических характеристик отмечалось не раз. Но их прогностическая значимость трудноопределима и, по-видимому, различна для разных параметров. По А.Д. Завьялову [2006], вероятность успешного прогноза по каждому из геофизических (в основном сейсмологических) предвестников не превышает 0,5. В новой модели Ю.Л. Ребецкого [2006] подчеркнута важность: а) дилатансионного разрыхления и автодиспергации среды в присутствии флюида в зонах скольжения; б) сверхбыстрой дегидратации сильно диспергированных участков, создающей аномально высокое давление флюида; в) мозаичного строения разломной зоны, определяющего случайный характер развития хрупкого разрушения.

Каковы же, по А.Д. Завьялову [2006], Г.А. Соболеву и А.В. Пономареву [2003], результаты, достигнутые на основе некоторых прогнозирующих алгоритмов? Алгоритмы “Калифорния–Невада” (КН) [Кейлис–Борок, Кособоков, 1986] и “Магнитуда 8” (М8) [Габриэлов и др., 1986] разрабатывались для прогноза периодов повышенной вероятности возникновения землетрясений на основе анализа свойств потока землетрясений. Алгоритм КН не получил распространения потому, что состояние тревоги объявлялось на большие площади. Этот же недостаток и у алгоритма М8, который продолжают развивать по пути дальнейшей формализации с уменьшением числа параметров и нижнего порога магнитуд прогнозируемых землетрясений. Алгоритм Мендосино [Kossobokov et al., 1990] дополнительно к КН и М8 уменьшает величину пространственно-временного объема тревоги в 3–4 раза для землетрясений с $M \geq 8$ и в 7–8 раз для землетрясений с $M \geq 7,5$. Однако ни один из алгоритмов не дает карт распределения вероятности возникновения сильного землетрясения в заданной точке рассматриваемой территории. Связи же большинства прогностических характеристик с

подготовкой землетрясения статистически подтверждены, но физически не обоснованы.

Алгоритм составления карт ожидаемых землетрясений [Завьялов, 2006] основан на сканировании их каталога с использованием прогностических признаков, из которых наиболее эффективен параметр плотности сейсмогенных разрывов. Обычно выделяется несколько зон высокой вероятности сильного события. Но в какой именно зоне оно произойдет, определить на основе алгоритма и отдельных входящих в него предвестников нельзя: нужны предвестники более краткосрочные и несейсмологические (уровень воды в скважинах, содержание радона, электромагнитные).

Важнейшее направление — анализ данных геофизического мониторинга [Любушин, 2007] с выявлением согласованности поведения геофизических полей, или, по [Haken, 1975; Olami et al., 1992], “кооперативных эффектов в синергетических нелинейных сильно неравновесных системах” в области подготовки к переходу в новое состояние перед будущим землетрясением. Перестройки структуры поведения одновременно всех регистрируемых процессов могут указывать на усиление диссипации тектонической энергии в виде активизации крипа, оползней, миграции подземных вод, а также, что особенно важно, на объединение (агрегацию) блоков земной коры. Пример такого подхода — на рис. 1: на графике *a* видна аномалия, предшествовавшая Таншанскому землетрясению (оно выделено правой вертикальной линией), на графике *б* модифицированного сигнала этот предвестник также выделяется надежно. Отчет-

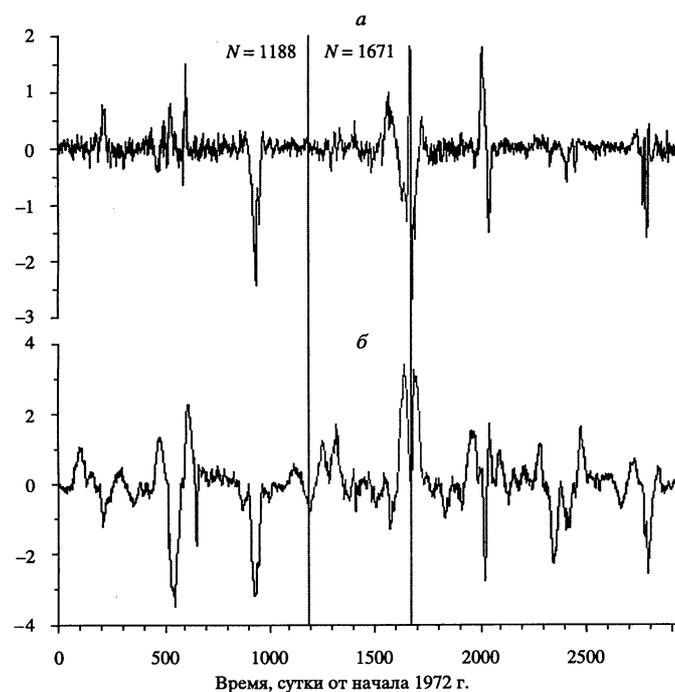


Рис. 1. Предвестниковые и постсейсмические аномалии на графиках агрегированных сигналов, Китай [Любушин, 2007] (*a*), на *б* сигнал модифицирован по сравнению с *a*

ливы на общем фоне графика *a* и другие аномалии. Но Хайчэнское катастрофическое землетрясение (левая вертикальная линия), успешно предсказанное (по другим данным) в том же районе Китая, на графике *a* не выявилось вовсе, тогда как на графике *б* заметны его предвестниковый и постсейсмический эффекты, а все аномалии более контрастны.

Как, однако, на этих и подобных графиках трактовать (не постфактум, а прогнозно!) иные вариации, не намного меньшие, а иногда и большие по амплитуде, чем предвестники, но не совпавшие с сильными землетрясениями, зарегистрированными на данном отрезке времени? Их причинами могут быть и рой слабых землетрясений, и активизация криповых движений, но также и сильные землетрясения, возникшие в другое время и в несколько других условиях, чем упомянутые. Очевидно, что, хотя предвестники конкретно Таншанского и в меньшей степени Хайчэнского землетрясений выявить апостериори в данном случае удалось, общее решение проблемы надежного *прогнозного* выделения признаков будущих разрушительных событий не достигнуто.

Еще одна иллюстрация этого — в работе А.В. Дешеревского и др. [2003]. Структура высокочастотных флуктуаций во временных рядах изученных параметров, в отличие от “белого” шума, когда связь динамики системы с прошлыми или будущими событиями отсутствует, указывает на наличие такой связи и на определенную упорядоченность в хаотической эволюции системы. По данным о микроземлетрясениях на Гармском полигоне за 10 лет выявлены во всех вычисленных рядах синхронные аномалии (рис. 2). К минимуму первой из них приурочено землетрясение ($M = 7,2$); вторая завершилась менее сильным, но более близким землетрясением ($M = 6,5$). Однако ни подготовка, ни реализация еще одного землетрясения ($M = 6,1$) сколько-нибудь отчетливо не проявились. В то же время многие участки представленных графиков, сходные с аномальными, не совпали с какими-либо значительными сейсмическими событиями.

О главной причине ненадежной распознаваемости аномалий-предвестников. Из сказанного ясно, что, какие бы факторы ни учитывались, динамика каких бы параметров ни отслеживалась и какие бы методы ни использовались, все сводится к стремлению как можно отчетливее выявить некую предвестниковую аномалию. Но очевидно и то, что если даже постфактум и после изощренной математической обработки данных, идентификация получаемых аномалий как предвестников конкретных землетрясений не всегда однозначна, то априори прогнозно она еще менее убедительна. Каковы причины этого, устранимы ли они?

Несомненно: смещение по крупному сейсмогенному разрыву с выделением большого количества энергии не может произойти без предшествующей подготовки — накопления упругой энергии в соматштабном разрыву объеме земной коры. Сопрово-

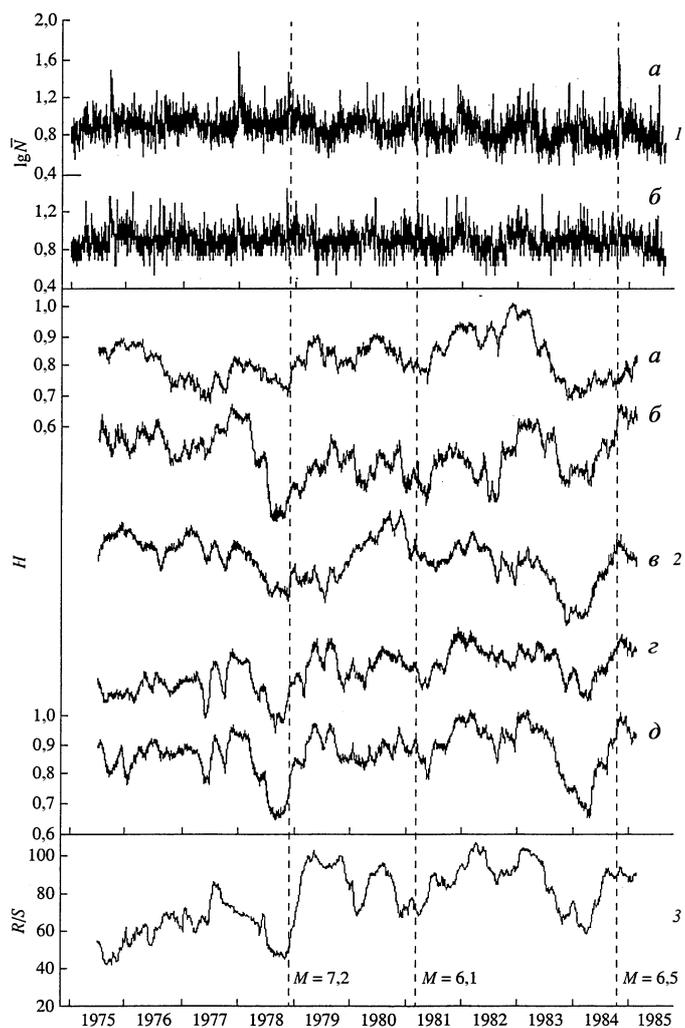


Рис. 2. Предвестниковые и постсейсмические аномалии, Таджикистан, Гарм [Дешеревский и др., 2003]: 1 — временные ряды логарифмов суточных чисел микроземлетрясений ($\lg N$) (*a* — осредненный временной ряд $\lg N$, *б* — пример исходного временного ряда $\lg N$ для одного пункта наблюдений); 2 — расчетные ряды показателя Хёрста H (*a–в* — примеры расчетов для трех индивидуальных рядов $\lg N$, *г* — расчет для осредненного ряда $\lg N$, *д* — осредненный ряд расчетов показателя H по индивидуальным исходным рядам $\lg N$); 3 — расчетный ряд величины R/S для осредненного ряда $\lg N$

даясь перестройками его внутренней и поверхностной структуры, изменениями сейсмического, гидрогеологического, гидрогеохимического режима, такая подготовка не может не фиксироваться в ходе должным образом организованного мониторинга. С какого-то момента должна возникнуть и нарастать аномальность изменения одного или нескольких отслеживаемых параметров.

Очевидно, что особенности изменений любого параметра во времени и пространстве обусловлены процессами, не только формирующими будущий сейсмический очаг, но и иными, связанными с сезонными факторами, приливными воздействиями, ритмичкой разнообразных локальных, региональных, глобальных и внеземных влияний. Они по отношению к полезному сигналу (прямым и косвенным

показателям накопления упругой энергии в области потенциального очага) являются помехами, подлежащими устранению при обработке результатов мониторинга. Имеются эффективные методы исключения этих помех.

Что же после такой чистки должна бы представлять получаемая конечная картина, оптимальная для прогноза будущего землетрясения? В “нулевом” приближении это, очевидно, должна быть определенная стадийность временного ряда: 1) невозмущенный, статистически однородный фон; 2) единичная, отчетливо обособленная аномалия-предвестник с завершающим ее сейсмическим событием; 3) восстановление однородного фона. Пример именно такой картины схематично показан на рис. 3 и 4, А. Но можно ли получить подобную картину в реальности? В весьма общем случае — нет. Почему?

Сильное землетрясение и непосредственно предвещающая его аномалия соответствуют раскалыванию крупного объема земной коры. Возможно ли, чтобы в нем до макораскалывания ничего не происходило (предшествующая стадия однородного фона)? Такое

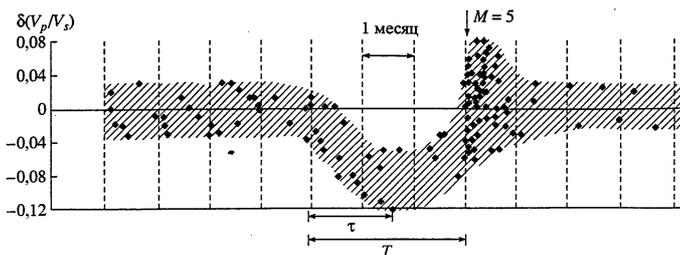


Рис. 3. Пример прогнозной стратегии с использованием долговременных вариаций величины отношения скорости распространения сейсмических волн (V_p/V_s) на Гармском полигоне [Дешеревский и др., 2003]

предположение нереалистично: геологической среде практически всюду, даже в тектонически стабильных областях, свойственна нарушенность, выраженная, в частности, рассредоточенной трещиноватостью. Каждый единичный акт ее развития есть разрыв, разгружающий малую часть (“микрообъем”) вмещающего объема. Очевидно, что в микромасштабе, как и в макромасштабе, это должно проявляться в множественных, подобных по форме, но микроскопических

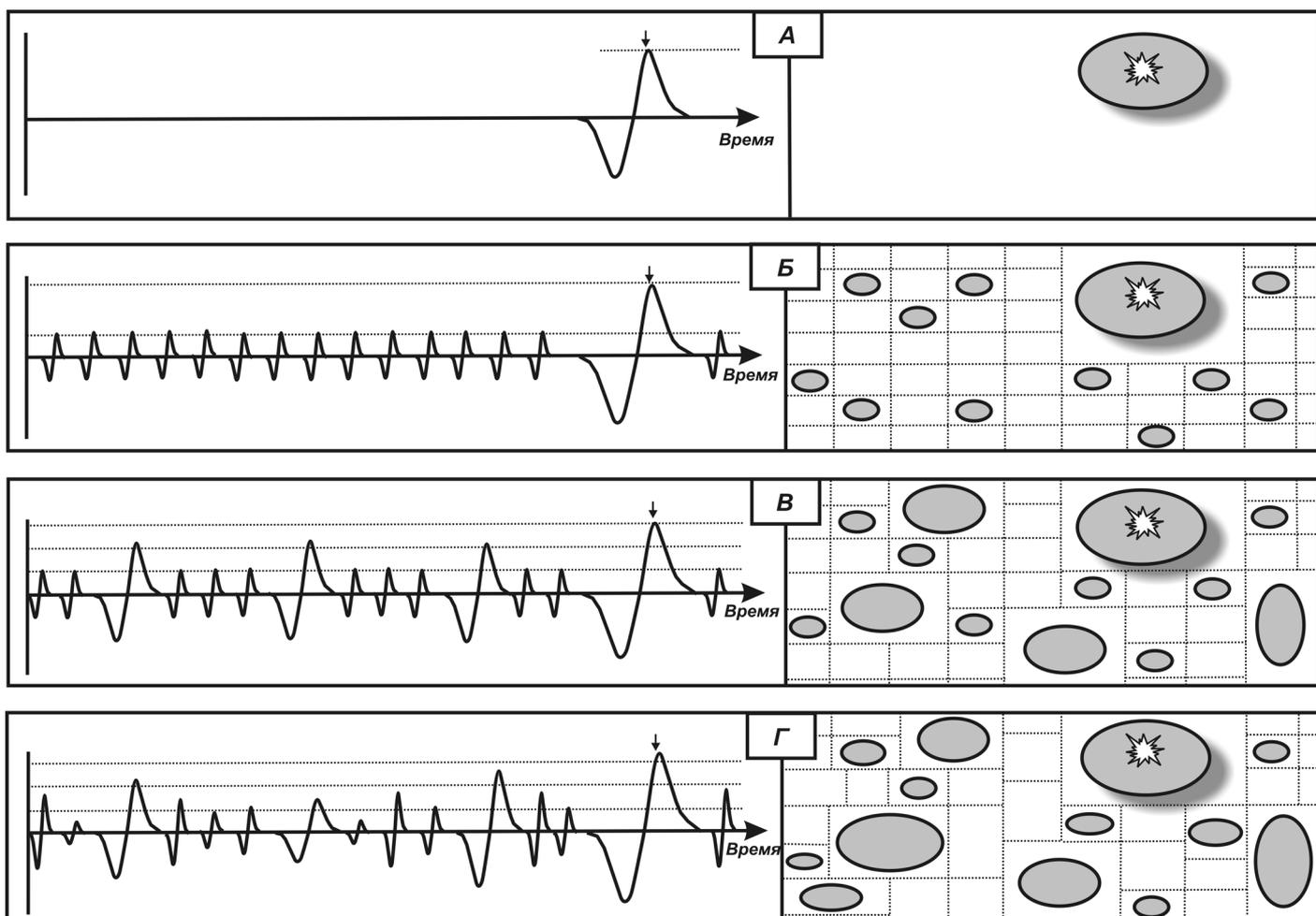


Рис. 4. Разноранговые аномалии-предвестники во времени (слева) и в пространстве (справа), принципиальная схема: А-Г — последовательные модельные приближения к реальности. Пунктирные линии: слева — ранговые уровни, справа — границы вмещаемых “микро- и мезомасштабных” объемов; овалы — потенциальные разномасштабные очаги; стрелки и звездочки — сильные землетрясения. Пояснения см. в тексте

аномалиях — случайных флуктуациях статистически однородного фона (рис. 4, *Б*). Сказанное приводит к модели среды, где раскалываемый макрообъем включает множество микрообъемов, раскалывавшихся до этого рассредоточенно и существенно случайно. Но реален ли *непосредственный* переход от множественных рассредоточенных микротрещин к макроскалыванию в области, где на протяжении достаточно длительного времени формируются очаги землетрясений — от слабых до разрушительных?

В экспериментах не раз показано, что реальный процесс предразрушения идет по-иному. Он начинается на высокоранговых элементах существующей структуры, на уровне кристаллической решетки минералов, рождая точечные, линейные, плоскостные и объемные ее дефекты, затем возникают микротрещины, их цепочки, “микроразрывы” с последующими их разрастаниями и взаимосочленениями. Происходит их ячеистое группирование, самоорганизуется новая иерархическая структура. Последовательно возникающие разноранговые разрывы постепенно стягиваются к некоторому макросечению, образуя вначале неровную цепочку, в итоге спрямляемую завершающим магистральным разрывом. Каждый единичный акт подобного процесса вызывает в ближайших окрестностях на своем масштабном уровне, а также на всех более высоких рангах множественные, в совокупности случайные перестройки напряженно-деформированного состояния, непредсказуемо предопределяющие размещение, ориентацию плоскостей и направление более поздних разрывных смещений.

Из сказанного следует, что достаточно тщательный геолого-геофизический мониторинг в любом макрообъеме должен будет выявлять наряду с аномалией, непосредственно предвещающей сейсмогенное макрораскалывание, множество других аномалий-предвестников более ранних разрывов на каждом из более мелких ранговых уровней в каждом из раскалывавшихся вмещаемых объемов. Макроаномалия — предвестник сильного землетрясения проявится, следовательно, не на квазиоднородном фоне. Она возникнет после (во времени) и среди (в пространстве) множества предшествующих (а в конечном счете и последующих) аномалий не одного, “микроскопического”, а нескольких подчиненных “мезоскопических” рангов (рис. 4, *В*).

Хотя такие подчиненные аномалии в свое время предвещали более слабые события (начиная от микроземлетрясений), и в этом смысле все они — полезный сигнал, но *по отношению к интересующей нас макроаномалии* они — помехи, которые должны быть устранены. Можно ли рассчитывать на достаточно отчетливое обособление именно аномалий-предвестников особо мощных и опасных землетрясений (например, с $M \geq 6$)?

К ответу на этот принципиальный вопрос подводят работы акад. М.А. Садовского и его последователей. Эмпирически показано и теоретически подтверж-

дено, что геологическая среда под сильной нагрузкой иерархически дезинтегрируется на отдельности со средним соотношением линейных размеров на смежных рангах всего 3,5 : 1. При столь небольшом межранговом соотношении, учитывая также естественный значительный разброс размеров конкретных объемов внутри любого ранга, нетрудно заключить, что надежная ранговая разбраковка сквозных разрывов, а соответственно и их аномалий-предвестников (и их агрегаций), нереальна. На любом временном отрезке и в любой области аномалии-предвестнику (агрегации) некоторого интересующего нас достаточно крупного ранга всегда будет предшествовать и пространственно с ней соседствовать множество подобных по форме аномалий по крайней мере одного-двух подчиненных рангов, незначимо отличимых по длительности и амплитуде от искомой (рис. 4, *Г*), что и наблюдается (рис. 1, 2). Чем обширнее исследуемые пространственно-временные области, тем большей будет такая неопределенность. Именно в невозможности уверенного разделения полезного сигнала и *таких* помех кроется причина принципиально неизбежной безуспешности сейсмопрогнозирования любыми методами.

Разумеется, не исключено, что некоторый исследуемый район в какой-то момент целиком окажется в сфере единичной растущей аномалии-предвестника “опасного” ранга. Это будет указывать на то, что местоположение и конфигурация района случайно угаданы так, что соседние и/или предшествующие мало контрастно отличные аномалии меньшего ранга оказались вне его границ. Однако отмеченная неопределенность должна была выступить и в этих границах, но раньше, на более высоких рангах. При расширении же временных и пространственных рамок исследования она непременно проявится в окрестностях такой будто бы единичной аномалии.

К этому следует добавить, что, даже надежно зафиксировав в реальном времени появление и формирование отчетливой и крупной бухтообразной аномалии, мы не можем быть уверены в том, что она завершится катастрофой. Это ясно уже из того, что, если бы каждая малая аномалия завершалась разгрузкой соответствующего объема, созревание очага более крупного ранга было бы невозможно. Причиной же может быть, например, то, что сильное сейсмическое событие, произошедшее в одном из смежных объемов (где идут аналогичные процессы), может непрогнозируемо спровоцировать как форсирование, так и затухание подготовки очага в исследуемом объеме данного ранга. Если учесть чувствительность поведения нелинейной неравновесной системы вблизи точки бифуркации к малейшему изменению условий, такое влияние могут оказать события и на более мелких рангах как в исследуемом, так и в смежных объемах.

В общем случае в перенапряженной системе любой фактор, любой самый слабый внешний импульс

(“взмах крыльев бабочки”) в любой момент, на любом масштабном уровне и в любом месте может — случайно — сыграть (или нет) роль триггера и вызвать внезапный, катастрофический отклик. Это, казалось бы, оправдывает отслеживание провоцирующих влияний даже слабых отдаленных, например, приливных воздействий. Но поскольку на любом конечном интервале времени всегда имеется множество подобных разнообразных по природе импульсов, невозможно надежно определить, какой из них вызвал перестройку в системе и с каким конкретно фактором связан данный импульс [Кондратьев, Люкэ, 2007]. А это закрывает путь к обоснованному прогнозированию. Подобные импульсы будет роднить только то, что они оказались триггерами. В этих обстоятельствах поиски некоторого одного, определенного предвестника или какого-либо их набора не могут не быть тщетными.

В связи с этим возникает вопрос: а что можно в принципе считать удовлетворительным эмпирическим свидетельством надежности тех или иных предлагаемых стратегий и методик прогноза? Что считать устойчиво повторяющимся подтверждением такого прогноза? Что должно давать уверенность в том, что такая повторяемость сохранится и в будущем?

Эмпирические подтверждения, сколь многочисленны они ни были бы, не доказывают надежности той или иной предлагаемой прогнозной стратегии или методики. Убедительный положительный или отрицательный результат проверки получается лишь по истечении сроков, на которые давался прогноз, т.е. тогда, когда он уже не нужен. Но уверенности в последующей устойчивости результата такой одной или нескольких проверок (немногих, учитывая малую частоту сильных землетрясений) это все равно не дает. С учетом сказанного ниже обсудим надежность ряда предлагавшихся методов.

Физическое моделирование и надежность сейсмогеодинамических прогнозов. В работе Д.Н. Осокиной [1989] на моделях, имитирующих разрывную структуру сейсмоопасных регионов Ирана, Туркмении, Памира, Тянь-Шаня, Калифорнии, исследованы локальные поля напряжений τ_{\max} . Наличие разрывов приводило к резкой дифференциации задаваемого в моделях исходного поля горизонтального субмеридиональ-

ного сжатия. Вдоль прямолинейных участков разломов напряжения τ_{\max} оказывались пониженными. Повышение τ_{\max} отмечалось у концов разрывов, на участках их нелинейного простираения и сочленения. В первых четырех регионах размещение эпицентров реальных землетрясений коррелирует с областями повышения локальных напряжений. Для зоны разлома Сан-Андреас (рис. 5) частые умеренные и слабые землетрясения характерны для областей повышения напряжения τ_{\max} , редкие же сильнейшие землетрясения отвечают участкам сильно пониженных значений напряжения τ_{\max} . Для Карпат и Балкан в условиях общего двухосного сжатия при широтной горизонтальной ориентации оси максимального сжатия часть областей повышения τ_{\max} в модели соответствует областям повышенной сейсмичности в природе. Для Копетдага в условиях меридиональной ориентации оси максимального сжатия характерна приуроченность сильных землетрясений к областям понижения, а тектонических узлов и части зон с повышенной сейсмической активностью — к областям повышения напряжений τ_{\max} .

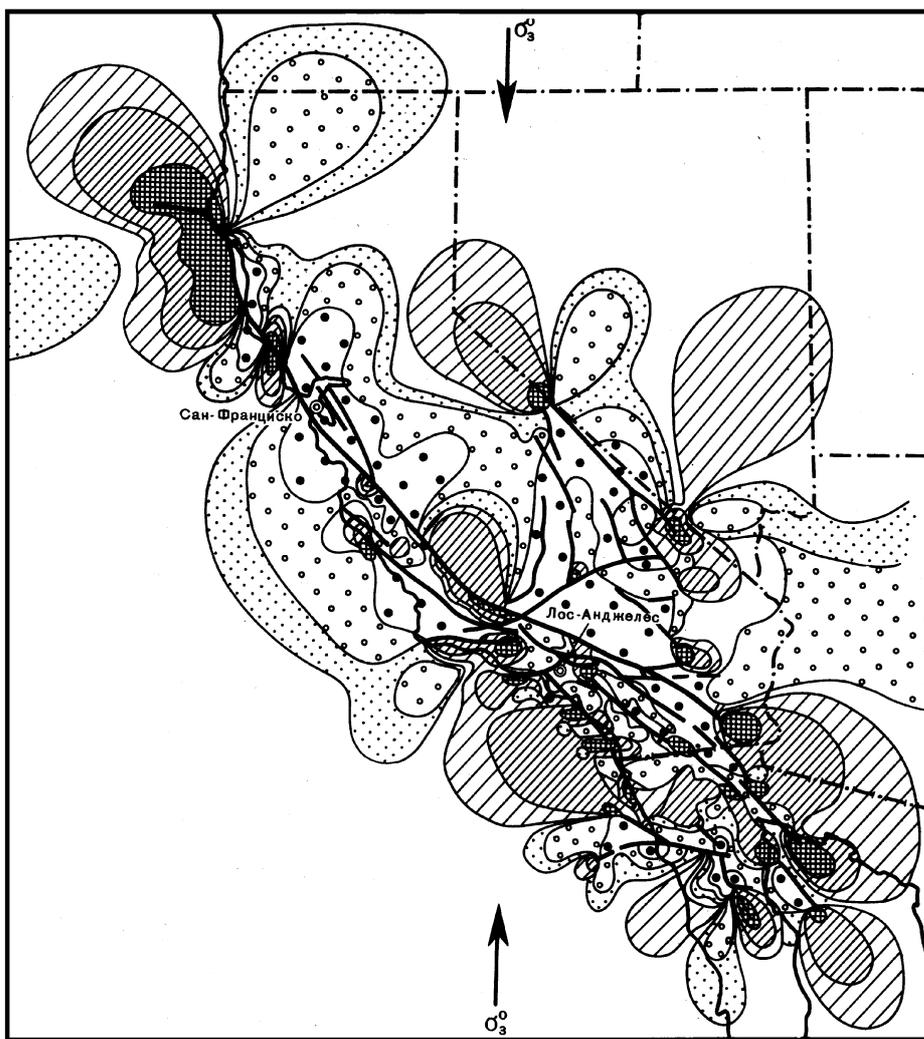


Рис. 5. Локальное поле напряжений τ_{\max} в модели, имитирующей систему разломов Сан-Андреас [Осокина, 1989]

Неоднозначность связи между напряжениями и сейсмичностью для разных районов и в пределах одного района Д.Н. Осокина объясняла зависимостью сильных землетрясений от действия напряжений разных рангов — мегарегионального и локального. Дополнительно подчеркивалось, что полного сходства локальных полей напряжений в модели и в природе быть не может, так как модель не воспроизводит многих особенностей систем разломов, полей напряжений, квазивязкого течения и пластических деформаций, механических свойств пород, величин коэффициента трения на разных отрезках разломов, наклонов их сместителей и т.д. Вместе с тем утверждалось, что если основные черты системы разломов и внешнего поля напряжений в модели соответствуют природным, то устойчивые и крупные области повышения и понижения величин локальных напряжений также будут адекватны реальности. Это должно относиться и к ориентации осей главных напряжений вблизи крупных разрывов.

Мы же полагаем, что следует существенно по-иному оценить применимость и сейсмопрогностическое значение физического моделирования для восстановления геодинамических условий по заданной структуре. Поясним это.

Пусть реальный крупный породный массив (в модели — блок ранга 1) разбит разрывами на блоки ранга 2. В эксперименте под действием горизонтального сжатия вмещающий и вмещаемые блоки деформируются, последние взаимно смещаются. Меняя ориентацию сжатия по отношению к разрывам, можно найти диапазон условий, при которых модельная картина деформации и перемещений устойчиво близка к реальной.

Однозначный отклик системы в виде смещений, адекватных реальности и отвечающих некоторому конечному диапазону ориентаций оси сжатия, должен, казалось бы, расцениваться как удовлетворительный результат. Ведь если определенная, заранее заданная картина получалась бы только при некоторой узко ограниченной ориентации осей напряжений, то она квалифицировалась бы лишь как крайне неустойчивое, случайное совпадение. Но деформирование дискретной среды — процесс нелинейный и в соответствии с фундаментальными положениями теории нелинейной динамики заведомо чрезвычайно чувствительный к начальным условиям. Противоречащий этому устойчивый результат моделирования требует объяснения. Оно представляется нам следующим.

В число начальных условий входит структура, заданная в модели. Пусть в ней блоки ранга 2 уступают по размерам вмещающему объему ранга 1 в несколько раз, что близко к наблюдаемому в реальной геологической среде. Более же мелких блоков в модели нет. Это подразумевает, что блоки ранга 2 принимаются квазиплоскими, и в качестве элементов ранга 3 должны выступать частицы модельного материала, по размерам уступающие блокам ранга 2 не в разы,

а на несколько порядков. Это грубое нарушение самоподобия структуры реальных, интенсивно нагружаемых массивов — свойства, которое сейчас никем не оспаривается. Какое это имеет значение?

Мысленно зададим в блоках ранга 2 блоки ранга 3, а в них — последовательно блоки рангов 4, 5 и т.д. с соблюдением указанного ранее размерного соотношения (в реальности чаще всего от 5:1 до 2:1). Получим быстро возрастающее множество разноранговых, неконтрастно различимых по размерам блоков и дизъюнктивных узлов с теми или иными векторами смещений в каждом из них. Именно подобная — глубоко иерархичная, грубодискретная, существенно адекватная реальности — структура и должна будет характеризоваться поведением (и размещением в тот или иной момент концентраторов напряжений разных рангов, конфигураций, интенсивности), чрезвычайно зависимым от малейших изменений начальных структурных и динамических условий, как это и предсказывается теорией.

Но в реальном эксперименте такую структуру задать нельзя. Это неосуществимо технически: возможности нарезки разноранговых блоков в небольших моделях чрезвычайно ограничены. Невозможно это и в принципе. Дело в том, что в реальный породный массив структура не привносится извне. Она самоорганизуется в нем в ходе естественного — многоциклового, нелинейного и непредсказуемого в деталях — процесса деформирования и разрушения при многократных переориентациях осей напряжения на каждом структурном уровне. Ни этот процесс, ни получаемая на том или ином его этапе структура в принципе невоспроизводимы. Исследователь не может приготовить систему, нелинейно эволюционирующую к некоторому наперед заданному результату.

Из этого следует, что даже если наиболее крупные модельные разломы в целом и соответствуют природным по ориентации и относительному расположению, то их *состояние* (простираения и падения отдельных отрезков сместителя, сочленения их между собой и с причлененными или пересекающими их разрывами, а следовательно, их способность воспринимать со-масштабную им нагрузку, характер их реакции на ее воздействие, условия конкуренции их как источников стока энергии между собой и неконтрастно отличными от них по размерам более высокоранговыми разрывами) будет кардинально и непредсказуемо изменчиво в зависимости от малейших деталей той или иной их предыстории. Соответственно будут непредсказуемо изменчивы картины возмущенного регионального поля напряжений, его соотношений с распределением происшедших землетрясений и размещением прогнозируемых потенциальных сейсмических очагов.

Это не означает абсолютной невозможности отдельных случаев достоверных предвестников и удачного прогноза, настойчивые упоминания о которых воодушевляют наиболее стойких энтузиастов. Просто

состояния прогнозируемости в ходе подобной эволюции сейсмотектонодинамической системы оказываются крайне неустойчивыми, и поэтому практически все землетрясения случаются неожиданно.

О геохимических и геодезических аномалиях-предвестниках. В работе В.И. Уткина [2000] изложен метод прогноза сейсмических событий на основе изучения выделений радона из породного массива, проницаемость которого при сжатии снижается, а при разгрузке увеличивается. Для области разломов Сан-Андреас, Хейвард, Калаверас (США, Калифорния) на ряде станций (рис. 6) выявлена тенденция к уменьшению выделения радона, что свидетельствует о существовании компактной зоны сжатия радиусом 28–30 км. Вместе с тем отмеченная тенденция осложнена чередованием локальных понижений и значительных по амплитуде увеличений концентрации (в связи со слабыми землетрясениями с $M < 3$). Вне зоны сжатия выделяется несколько зон как с

тенденцией к увеличению концентрации радона, так и без каких-либо отчетливых изменений, что трактуется как “чередование зон нагрузки и разгрузки”. Аналогичные “чередования” выявлены в юго-восточной части разлома Сан-Андреас и других районах. В среднем, по В.И. Уткину, зона сжатия, связанная с динамическим уменьшением концентрации радона, ограничена расстоянием от эпицентра 24 ± 15 км. С увеличением магнитуды будущего землетрясения радиус зоны увеличивается. Судя по динамике эксгаляции радона, подготовка землетрясения начинается за 3–4 месяца до сейсмического события, проявляясь особенно четко за 1–2 недели до него. Подчеркивается, что реализация прогноза требует создания системы мониторинга по всей сейсмогенной площади с расстоянием между станциями не более 25 км.

В рассмотренном материале мы вновь видим, что в каждом конкретном случае “зона сжатия” как место созревающего очага проявляется отнюдь не на однородном фоне, а в соседстве с несколькими “чередующимися зонами нагрузки и разгрузки”, и, следовательно, она не единична. При этом из-за кратковременности мониторинга не намечены какие-либо четкие критерии выбора некоторой одной зоны в качестве достоверной аномалии-предвестника наиболее зрелого очага. Такой статус приписывается постфактум, по произошедшим землетрясениям. Между тем при большей длительности и площади реализации мониторинга в условиях грубой дискретности и структурного самоподобия геологической среды априорное, прогнозное выделение аномалии-предвестника будет еще менее надежным.

Метод, предложенный А.К. Певневым (1998), исходит из того, что причина зарождения сейсмического очага — локальная заторможенность сдвигания по разлому с накоплением деформаций упругого изгиба. Подготовка прорыва тормозящей “спайки” должна отслеживаться путем детального геофизического (с фиксацией форшоков) и геодезического изучения смещений и деформаций земной поверхности. Но для прогноза места очага и силы землетрясения необходимо, по А.К. Певневу, заранее обнаружить (!) такой участок сейсмогенной зоны. По его размеру должна предсказываться сила землетрясения, а по результатам последующих наблюдений — время события.

Здесь вновь приходится указать на то, что принципиально неустранимым препятствием в предварительном обнаружении места (и величины) назревающего очага, а следовательно, и территории, на которой нужно развернуть детальные непрерывные наблюдения, является необходимость выбора некоторого одного из нескольких или многих “кандидатов”. А это при малой контрастности их различий в грубодискретно и самоподобно структурированной геологической среде не может быть достаточно надежным. К тому же, например, для сейсмоактивной зоны разлома Сан-Андреас длиной 1300 км и шириной (включая оперяющие сейсмоактивные разрывы)

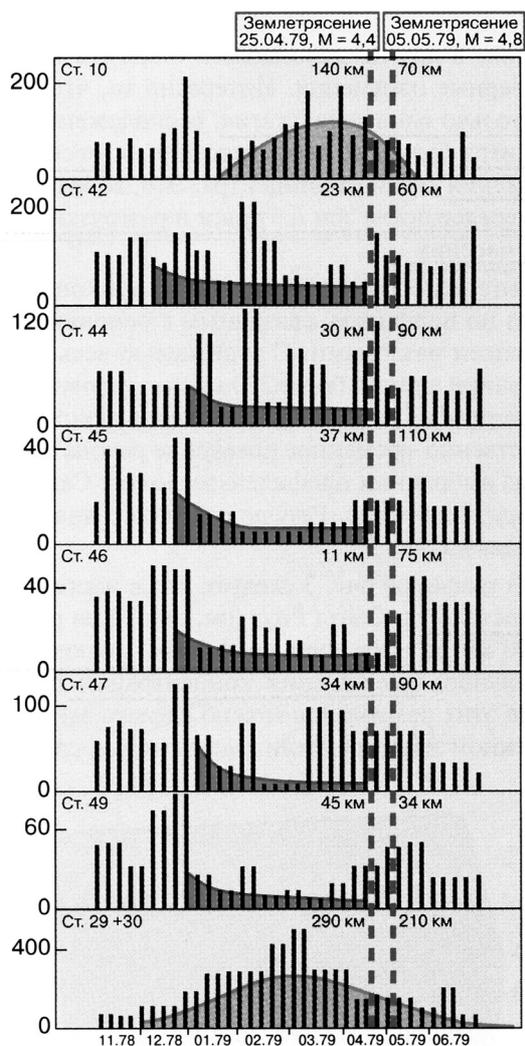


Рис. 6. Графики изменения во времени концентрации радона для отдельных станций в системе разломов Сан-Андреас [Уткин, 2000]. Штриховые линии — даты землетрясений. Цифры рядом с ними — расстояния от станции наблюдения до эпицентра. Зате-нены аномальные изменения концентрации

до 100 км детальные геодезические и геофизические наблюдения едва ли перспективны, учитывая “грустную историю” предшествовавших попыток такого выбора [Kagan, Jackson, 1994].

Важно, как и ранее, подчеркнуть, что, какой бы признак опережающего созревания одного из потенциальных очагов ни был избран, он в условиях самоорганизованной критичности среды может даже на коротких интервалах времени попеременно указывать на разных “кандидатов”, взаимно конкурирующих в ходе отнюдь не монотонно развивающейся динамической и структурной подготовки. Об этом говорят примеры весьма быстрых и значительных перестроек напряженно-деформированного состояния под действием, например, землетрясений в соседних районах.

Заключение. В чем бы ни усматривать признаки приближающегося землетрясения, проблема его надежного прогнозирования не только в трудностях отделения полезного сигнала от шумов, но и в характере самого сигнала. Он в силу фрактальности и грубой дискретности геологической среды на любой площади и на любом отрезке времени дает не единичную, четко обособленную предвестниковую аномалию, а всегда некоторое множество разноранговых всплесков, притом на смежных рангах не контрастно различающихся, а внутри рангов — флуктуирующих по амплитудам и длительности.

Именно неустранимая, непреходящая множественность, объективно нечеткая внутри- и межранговая различимость как действительных, так и мнимых

предвестников объясняет ненадежность критериев выделения наиболее зрелых и крупных потенциальных очагов. А это — в условиях чрезвычайной чувствительности поведения нелинейных геосистем к начальным и изменчивым текущим условиям — порождает крайнюю неустойчивость прогноза еще и в зависимости от площади и длительности наблюдений и как следствие неприемлемо большой процент ложных тревог и пропусков цели. Бифуркационность сейсмического и других природных процессов объективно кладет конец долгой и драматичной погоне за фантомом ускользающей предсказуемости геокатастроф. Унаследованное от классической науки убеждение в том, что совершенствование инструментов и методов познания приводит в пределе к точным и надежным прогнозам, оказалось иллюзорным. Точный прогноз оказывается крайне ненадежным, надежный прогноз — неточным.

Но это, разумеется, вовсе не означает ни “краха науки”, ни утраты ею предсказательного потенциала. Современная наука не только приняла вызов науки классической. Она вполне адекватно, но в высшей степени нетривиально ответила на него, открыв и продемонстрировав парадоксальную способность: обоснованно предсказывать... *непредсказуемость* траекторий эволюции обширного класса систем, о возможности и даже неизбежности хаотического поведения которых ранее не подозревали.

Этот вывод, по нашему мнению, вполне приложим и к проблеме прогнозируемости сейсмичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Габриэлов А.М., Дмитриева О.Е., Кейлис-Борок В.И., Косококов В.Г. Долгосрочный прогноз землетрясений: (Метод. рекомендации). М.: ИФЗ АН СССР, 1986.
- Гусев Г.А., Гуфельд И.Л. Прогноз землетрясений и построение нелинейной теории сейсмического процесса // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов: Мат-лы Второго Междунар. симпозиума в рамках Междунар. года гор. М.; Бишкек: ОИВТАН, 2003. С. 222–232.
- Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я. Флуктуации геофизических полей и прогноз землетрясений // Физика Земли. 2003. № 4. С. 3–20.
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006.
- Кейлис-Борок В.И., Косококов В.Г. Периоды повышения вероятности возникновения для сильнейших землетрясений мира // Вычисл. сейсмология. 1986. Т. 19. С. 48–58.
- Кондратьев О.К., Люкэ Е.И. Наведенная сейсмичность и проблема прогноза землетрясений // Геофизика. 2007. № 5. С. 6–21.
- Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007.
- Моргунов В.А. Реальности прогноза землетрясений // Физика Земли. 1999. № 1. С. 79–91.
- Осокина Д.Н. Моделирование тектонических полей напряжений, обусловленных разрывами и неоднородностями в земной коре // Экспериментальная тектоника (методы, результаты, перспективы). М.: Наука, 1989. С. 163–197.
- Певнев А.К. Прогнозировать землетрясения можно // Вестн. РАН. 1998. Т. 68. № 11. С. 999–1006.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
- Ребецкий Ю.Л. Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании // Флюиды и геодинамика: Мат-лы Всерос. симпозиума “Глубинные флюиды и геодинамика”. М.: Наука, 2006. С. 120–146.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003.
- Статива А.С. Современное состояние прогноза землетрясений и некоторые его проблемы // Изв. вузов. Геология и разведка. 1991. № 8. С. 125–131.
- Уткин В.И. Радон и проблема тектонических землетрясений // Соросовский образ. журн. 2000. Т. 6, № 12. С. 64–70.
- Bak P., Tang C. Earthquake as a self-organized critical phenomenon // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94. P. 15635–15637.
- Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. Earthquakes cannot be predicted // Science. 1997. Vol. 275. P. 1616–1617.
- Haken H. Cooperative effects in systems far from equilibrium and in nonphysical systems // Rev. Mod. Phys. 1975. Vol. 47. P. 67.
- Huang J., Turcotte D.L. Are earthquakes an example of deterministic chaos? // J. Geophys. Res. 1990. Vol. 17. P. 223–226.

Kagan Y.Y., Jackson D.D. Earthquake prediction: a sorrowful tale // AGU West Pacif. Geophys. Meet. Hong Kong (July 25 – 29, 1994). 1994. P. 57–58.

Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.V. Localisation of intermediate-term earthquake prediction // J. Geophys. Res. 1990. Vol. 95, N 12. P. 19763–19772.

New model suggests quakes are random // Geotimes. 1993. Vol. 38, N 2. P. 7.

Olami Z., Feder H.J.S., Christensen K. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68, N 8. P. 1244–1247.

Pavlos G.P., Latousakis J., Dialotis D. Looking at a seismic event as a chaotic deterministic process // [Pap.] Eur. Geophys. Soc. 16th Gen. Assem. “Atmos., Hydros. and Space Sci.”, Wiesbaden (22–26 Apr. 1991) // Ann. Geophys. 1991. Vol. 9. P. 538–539.

Кафедра динамической геологии:
Н.В. Короновский, профессор, зав. кафедрой,
e-mail: koronovsky@dynamo.geol.msu.ru;
А.А. Наймарк, старший научный сотрудник,
e-mail: fnaim@ya.ru

Поступила в редакцию
04.03.2008