

УДК 550.343

Н.В. Короновский¹, В.С. Захаров², А.А. Наймарк³**НЕПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ:
НОВОЕ ПОНИМАНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЕЕ РЕШЕНИЕ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Неэффективность краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений очевидна. Новые методы и гипотезы подготовки сейсмических событий интересны, но точных и надежных прогнозов не последует. Непрогнозируемость, безусловно, предопределена нелинейностью, самоподобием, хаотичностью (не стохастичностью), бифуркационностью динамики сейсмического процесса во фрактальной геосреде. «Сверхчувствительность» геодинамических систем к начальным условиям и параметрам, неотчетливость различий фоновых и аномальных структур и состояний — при жестких требованиях к адекватности и репрезентативности прогнозов — неизбежно приводят к негативному решению проблемы. Статья продолжает давнюю научную дискуссию о прогнозе землетрясений, возобновившуюся после публикации нашей работы [Короновский и др., 2019].

Ключевые слова: сильные землетрясения, краткосрочный прогноз, нелинейная геосистема, хаотическая динамика, механизм сейсмичности, непрогнозируемость.

The inefficiency of short-term forecasting of strong earthquakes is obvious. New methods and hypotheses of preparation of seismic events are interesting, but exact and reliable forecasts will not follow. Unpredictability is undoubtedly predetermined by nonlinearity, self-similarity, by a chaotic (not stochastic) and by bifurcations dynamics of seismic process in fractal geosystem. Superdependence of dynamic systems on initial conditions, vagueness of distinctions of background and abnormal structures and conditions, at rigid requirements to adequacy and representativity of forecasts, inevitably lead, to the negative decision of a problem. This article continues the long-standing scientific discussion about earthquake prediction, which was resumed after the our publication [Koronovsky et al., 2019].

Key words: strong earthquakes, the short-term forecast, nonlinear geosystem, chaotic dynamics, the mechanism of seismicity, unpredictability.

Введение. По мнению многих исследователей, сильные землетрясения в принципе прогнозируемы. В то же время ненадежность и неточность прогнозов, особенно краткосрочных, общеизвестны. В мировом сейсмологическом сообществе долгие годы продолжается дискуссия, одной из отправных точек которой была публикация К.Дж. Геллера с соавторами [Geller et al., 1997]. Путь к преодолению неудач видят в разработке более адекватных представлений о природе сейсмичности на основе совершенствования мониторинга процессов в литосфере. Иная позиция, в рамках нелинейно-динамического подхода к изучению геокатастроф, была заявлена в [Захаров, 2011, 2013; Наймарк, 1997, 1998а, 2000] и развита в [Захаров, 2014; Короновский, Наймарк, 2009, 2012; Наймарк, Захаров, 2012]. В научной дискуссии (сентябрь-октябрь, 2019; ИФЗ РАН) проблема непрогнозируемости рассматривалась в свете двух конкурирующих гипотез: традиционной «разрывной» и развиваемой сейчас «дегазационной». Некоторые выводы

первой из них учтены в обсуждавшейся тогда публикации [Короновский и др., 2019]; вторая была отражена в монографии [Гуфельд, 2019] и в выступлениях ее автора.

Здесь сначала проводится анализ адекватности упомянутых эмпирических гипотез подготовки сейсмических событий, включая результаты тектонофизического моделирования, с критическими оценками предлагавшихся прогнозных рекомендаций. Затем мы переходим к обобщению характеристик статистических распределений структурных элементов геосреды и сейсмических событий (по размерам и магнитуде соответственно). Но акцент на независимости этого материала от гипотетических построений радикально меняет фокус проблемы: на первый план выходят фундаментальные факторы непрогнозируемости. В итоге становятся очевидны принципиальные и неустраняемые препятствия на пути решения проблемы прогноза. Оценки убедительности и практической значимости таких выводов невозможны без учета спе-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор, докт. геол.-минер. н.: e-mail: koronovsky@rambler

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор, докт. геол.-минер. н.: e-mail: zakharov@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, канд. геол.-минер. н.: e-mail: fnaim@ya.ru

цифики и современного состояния краткосрочного прогнозирования, а также требований, предъявляемых к прогнозам.

Краткосрочный прогноз и требования к нему.

Краткосрочный прогноз задает конкретные условия принятия неотложных мер для минимизации людских потерь и материального ущерба от конкретной прогнозируемой катастрофы [Короновский и др., 2019]. Его адекватность и практическая применимость обеспечиваются жесткими допусками по полноте, точности и надежности основных параметров ожидаемого события. Так, место определяется координатами эпицентра, радиусом ($R=30$ км) круговой эпицентральной зоны с допустимой погрешностью ± 30 км. Следует указать также границы и размеры более обширного сектора прогнозной ответственности (СПО). Энергия, выделяемая при землетрясениях, характеризуется магнитудой (M) с допустимой погрешностью от ± 1 до $\pm 0,1$ от меньших значений магнитуды к большему. Пороговая магнитуда сильных землетрясений составляет $5,5 \pm 0,5$. Время определяется датой ожидаемого землетрясения с допустимой погрешностью ± 3 сут и упреждением (опережением) прогноза $0,5-3$ сут до ожидаемого события.

Результативность прогнозирования характеризуется: а) подтвержденностью заявленных прогнозов, обычно немногих, при этом множество непредсказанных землетрясений не учитывается; б) эффективностью, или надежностью, прогнозирования: отношением числа успешно предсказанных землетрясений к числу зарегистрированных за время исследований в диапазоне магнитуды от $5,5 \pm 0,5$ и выше в границах заданного СПО. При этом достаточная эффективность должна составлять не менее 85–90%, в то время как достигаемая эффективность для реальных прогнозов — обычно несколько процентов. Аномально высокая эффективность, достигаемая редко и локально, непредставительна для оценки глобальной применимости апробируемых методик, поскольку, как правило, не может быть повторена. Подчеркнем: приведенные количественные ограничения по размерам СПО и погрешностям по времени и магнитуде можно обсуждать, но их жесткая определенность — необходимое условие практической применимости прогноза.

Состояние проблемы. Обзор современного состояния с краткосрочным прогнозом дан нами в предыдущих работах [Короновский, Наймарк, 2009, 2013; Короновский и др., 2019], здесь приведем краткое резюме. К настоящему времени доля корректно краткосрочно прогнозированных сильных землетрясений среди зарегистрированных не более нескольких процентов. Отличия аномальных структур и состояний от фоновых, а также форшоков от «соответствующих главных» землетрясений зачастую неотчетливы и проблематичны. Соотношения прогнозных оценок ожидаемых

землетрясений по аномалиям-предвестникам с характеристиками конкретных реальных событий неоднозначны, попытки осреднений неэффективны и в краткосрочном прогнозировании практически бесполезны. Подавляющее большинство сейсмических катастроф остается неожиданными, несмотря на совершенствование аппаратуры и методов наблюдений, регистрации, обработки, анализа данных и интерпретации получаемых результатов.

Все без исключений сообщения о якобы достигнутой высокой эффективности краткосрочного прогнозирования — случаи нерепрезентативного, локального, кратковременного успеха или/и результаты прогнозирования с точностью, не удовлетворяющей требованиям.

Актуальные концепции подготовки землетрясений: предвестники и перспективы. 1. «Разрывная» модель.

В традиционных представлениях землетрясение — финальная катастрофическая стадия локальной перестройки иерархически организованной разломно-блоковой структуры геосреды и соответствующих физических полей. Важный компонент модели — возникающие в узлах сети разрывов разномасштабные аномалии, концентрации тектонических напряжений, которые рассматриваются как гипотетические предвестники резких сдвигов («срывов») и, как следствие, землетрясений определенной энергии, ожидаемых в определенных местах и в определенное время.

В условиях стесненности деформаций и перемещений препятствовать сдвиганиям агрегаций и отдельных плит, блоков и их фрагментов по разломам могут даже плавные искривления сместителей, но чаще — дислокации на пересечениях и субпоперечных сочленениях разрывов. Так, сдвиг по активному разрыву делит пересекаемый пассивный разлом на два поперечно взаимораздвинутых отрезка, блокируя продольные подвижки по ним. При активизации пересеченного разлома смещения вдоль него разрушают блокирующий поперечный уступ («зацеп»), после чего пересекавший разлом сам оказывается пересеченным и заблокированным. Аналогично крупный разлом, субпоперечно пересекаемый активными меньшими нарушениями, осложняется зацепами, тормозящими смещение по нему. Со временем такая зазубренность может сглаживаться, затем обновляться. Концентраторами напряжений служат также острые концевые замыкания трещин и активных разломов.

В межплитных и межблоковых зонах дробления препятствовать подвижкам могут угловые выступы неравномерно выдвинутых и/или повернутых блоков. Множественные разрывы в мелких и средних блоках, разрастаясь, раскалывают более крупные блоки, что порождает более или менее значительные землетрясения. Наконец в некотором крупном массиве препятствие, блокирующее сдвигания по крупному разрыву, оказывается сорванным («главный» толчок) с выделением боль-

шого количества энергии в виде сейсмических волн и с разрушениями на дневной поверхности. Похожие ситуации неоднократно воспроизведены при лабораторном тектонофизическом моделировании.

На такой основе зародились представления о том, что главному толчку должны предшествовать определенные структурные перестройки, в том числе «форшоки» (предваряющие главное событие более слабые землетрясения) и соответствующие геолого-геофизические, геодезические и другие аномалии, заметно нарушающие относительно стабильное («фоновое») состояние геосреды. Ожидалось, что они, будучи выявленными в ходе должным образом реализуемого мониторинга, окажутся надежными предвестниками сейсмических катастроф. Многие из таких предвестников обнаруживают, по [Любушин, 2014], сходство с физическими и химическими закономерностями поведения геоматериалов в опытах, моделирующих подготовку очага сейсмокатастрофы. К настоящему времени предложено множество предвестников — прямых (литосферных), косвенных (метеорологических, биологических, космических), элементарных и комбинированных.

Построенная на этих предпосылках стратегия краткосрочного сейсмопрогнозирования применяется более полувека. Но ни один из предвестников — ни по отдельности, ни в сочетании с другими — не оправдал ожиданий: реальные землетрясения существенно отличались от прогнозов по некоторым или по всем трем показателям или не происходили. Успешные, отвечающие современным требованиям прогнозы составляют не более нескольких процентов от числа зарегистрированных сильных землетрясений.

Хотя поиски надежных предвестников все еще продолжаются, крепнет убежденность в том, что неадекватны не только конкретные предвестники, но и исходная геофизическая модель сейсмического процесса. Подкрепляется это аргументами, которые сами не свободны от неясностей. Так, по [Гуфельд, 2019], в поверхностном слое земной коры зацепления выступов на границах геоблоков, предполагаемые (по аналогии с результатами лабораторного моделирования контактных взаимодействий шероховатых поверхностей) в условиях стесненности, невозможны. Мнение о том, что разрывная модель базируется в основном или даже исключительно на результатах лабораторного экспериментирования — преувеличение. Непосредственно наблюдаемые геологами признаки множества реальных разномасштабных, разноориентированных, разновременных подвижек вполне очевидны; возникающие вследствие подвижек зацепы соответствующих масштабов, а в моменты их срывов — частые слабые, реже средние землетрясения — вполне обычны.

Неоднозначность соотношений предвестников с прогнозами, а прогнозов с событиями привела

И.Л. Гуфельда к выводу: предлагаемые предвестники землетрясений не являются таковыми, не могут и не должны ими быть (о возможности иной трактовки упомянутой неоднозначности будет сказано далее).

Возможно ли сильное землетрясение без предвестника? На поверхности и в приповерхностных слоях сильное землетрясение всегда выражено смещением блоков по крупному разлому. В иерархически структурированной среде оно возникает в результате последовательности нарушений: от рассеянных мелких к группирующимся средним, стягивающимся к крупному магистральному разрыву в объеме соответствующего ранга. Именно такая картина воспроизводится при традиционном тектонофизическом моделировании. Утверждение, что при этом в эксперименте используются «монолитные» образцы пород, ошибочно. В ходе эксперимента всегда выясняется, что в образце существовали разномасштабные структурно ослабленные зоны, изначально незаметные, но под нагрузкой выявляющиеся циклично-последовательно, «реверс-каскадно», в виде нарушений от мелких к крупным в каждом цикле по мере увеличения нагрузки (подробнее в [Наймарк, 1998б,в; 2003]). Подвижкам по каждому из таких нарушений с возникновением зацепов отвечает сейсмическое событие соответствующего ранга. По степени и характеру аномальности таких предполагаемых предвестников, казалось бы, можно в принципе предсказать параметры ожидаемого главного толчка.

По И.Л. Гуфельду, в режиме слабой сейсмичности и деформации обнаружены гармоника с периодами от часов-суток до многих лет, а фокальные механизмы очагов указывают на значительную неоднородность, случайность локальных полей напряжений. Их быстрые разномасштабные и несинхронные изменения в условиях квазипостоянных градиентов литостатического давления и температуры не могут быть связаны с медленными тектоническими движениями. Это, по И.Л. Гуфельду, может означать, что поверхностный слой реагирует на подготовку землетрясений не непосредственно, не как предвестник конкретных событий, а косвенно, фиксируя активизацию иных глубинных процессов, вызывающих вариации напряженного состояния так, что измерения в одной точке отражают ситуацию на значительной территории. Однако нередко в таких случаях, игнорируя фактор глубинности, ретроспективно подбирают конкретному землетрясению «подходящее» локальное возмущение-предвестник какого-либо параметра, удаленное от эпицентра на расстояние до 1000 км, а во времени — от суток до многих лет. При этом некоторые сильнейшие события оказываются пропущены, а другие ожидалось, но не происходили. Анализ сейсмического режима (затишья, кольцевая сейсмичность, миграция

очагов слабых землетрясений и др.) показывает значительную неопределенность прогноза сейсмоопасности по времени и месту.

Если данные мониторинга не обнаруживают устойчивой связи с цикличностью сейсмического процесса, то они, по мнению И.Л. Гуфельда, могут не предвещать землетрясения, а отражать действие процессов, косвенно обусловленных подготовкой сейсмических актов, например, вариациями скорости вращения Земли. Наблюдаемые возмущения различных параметров в поверхностном слое, отражая региональный процесс, не обязательно представляют собой предвестники конкретных землетрясений. Вследствие этого, по И.Л. Гуфельду, разработка принципов и методов краткосрочного прогнозирования сейсмоопасности на основе традиционной, существенно эмпирической разрывной модели бесперспективна. Но возможность обнаружения признаков сейсмической опасности все же не исключена. Надежды возлагаются на новую концепцию, которой, однако, предстоит еще справиться с собственными проблемами.

2. «Дегазационная» модель. По [Гуфельд, 2019], глубже 5–6 км, в условиях медленных тектонических движений и предельных напряжений (без локальных концентраций) сильные землетрясения в принципе невозможны. Но они происходят, причем всегда неожиданно. Возможно ли прогнозирование? Предполагается, что да, если знать природу событий, характер межблоковых взаимодействий, а также параметры геофизического режима, позволяющие выделить фоновое и предкатастрофическое состояния среды, а также определить локализацию эпицентральной зоны.

Согласно этой концепции взаимодействие восходящих потоков водорода с твердой фазой геосреды непрерывно изменяет объем ее структурных элементов и напряженное состояние. Размеры «всплывающих» деформационных волн контролируют энергию землетрясений. Медленное течение породных масс сменяется, после кратковременных консолидаций блоков с раздробленной межблоковой средой, быстрыми крупномасштабными подвижками. В поверхностном слое локальные возмущения различных параметров неоднозначно сочетаются с конкретными землетрясениями.

В фоновом режиме при квазипостоянных градиентах давления и температуры в литосфере основной фактор непрерывных вариаций внутриблоковой сейсмичности — упругие волны отдаленной сейсмичности, периодические вариации объема структурных элементов, влияющие на скорость газового потока, что в свою очередь влияет на поле напряжений. Нарушения аккомодации граничных структур асинхронны в смежных зонах.

Переход к предкатастрофическому состоянию выражен локализацией сейсмичности («сейсмический узел»). Это непрерывные, иногда быстрые структурные перестройки (без связи с медленными

тектоническими движениями), всплывания разнонаправленных деформационных волн, быстрые перескоки сейсмического узла, длительность существования которого (период опасности) в конкретной зоне варьирует от нескольких часов до нескольких суток. В зоне субдукции синхронизация колебательных движений указывает на вероятную эпицентрально-зону предстоящего сильного землетрясения. Переход к рассинхронизации длится от нескольких часов до суток. Зона контакта плит маркируется гипоцентрами. Внутри погружающейся океанической плиты магнитуда сейсмического фона не более 6,0–7,0.

При этом время и магнитуда вероятного события не прогнозируются, их предвестников нет. Фокальные механизмы показывают неоднородность внутриблоковых полей напряжений; сейсмический процесс недетерминирован. Непрерывная внутриплитная сейсмичность различного уровня не разрушает целостность океанической плиты, механические зацепления там нереальны [Гуфельд, 2019].

С традиционных позиций концентрация напряжения на зацепах по границам движущихся блоков должна быть триггером для сильных землетрясений. Блокировки движений в некоторых местах должны нарушать поля временной консолидации. На такой основе возникли идеи о сейсмических брешах и о цикличности в них сильных землетрясений, что, по И.Л. Гуфельду, вызывает вопросы.

Почему при относительной стабильности внешних и внутренних *P-T* условий длительность цикла сильно варьирует? Если в зоне бывшего очага не было сильного землетрясения около 70 лет, означает ли это завершение цикла? Какова стадия цикла в данный момент? Каковы признаки форшока как предвестника возможного сильного землетрясения, действительно ли, как утверждал И.Л. Нерсесов, форшоки «не имеют визитной карточки» [Гуфельд, 2019, с. 43]? Действительно ли сильные землетрясения случайны? Что отражает периодичность сейсмоактивности в десятки и сотни лет? Оценка зависимости колебательного режима от состояния соседних зон требует одновременного мониторинга разномасштабных движений всех частей мегаразломно-блоковой структуры.

На геосреду одновременно и непрерывно действуют различные фоновые природные силы. При этом остается неизвестным, какой фактор действует на какие процессы или состояние среды, какие процессы произошли в среде после этого и отражает ли контрольный мониторинг эти процессы. Сильные коровые землетрясения сейчас нельзя предсказать. То, что слабая сейсмичность как реакция среды на внешнее воздействие вызывает разрядку тектонических напряжений — заблуждение. Даже при сильнейших землетрясениях

снимается малая часть фоновой упругой энергии, обусловленной литостатической нагрузкой выше границы коры [Гуфельд, 2019].

Предварительные выводы: на пути к новому пониманию проблемы. Разрывная концепция краткосрочного прогнозирования по предвестникам испытывалась на адекватность достаточно долго. К настоящему времени скромные возможности эмпирического прогнозирования на ее основе, очевидно, близки к исчерпанию. Прикладные исследования сведены к поискам новых, потенциально более эффективных (но в итоге разочаровывающих) предвестников и к афишированию редких локальных успехов. Теории традиционных версий рассмотренной концепции существенного развития не получили.

Но на основе современного нелинейно-динамического подхода теоретический потенциал разрывной модели, как оказалось, может парадоксальным образом проявиться в объяснении и обосновании принципиальной невозможности получения качественных прогнозов. Ранее был проанализирован нелинейный процесс разрывообразования в иерархически структурированной (фрактальной) грубодискретной среде в диапазоне микро-мегаразрывов; диапазон «глубина—поверхность» не рассматривался [Наймарк, 1998в, 2001, 2003]. В таком контексте оценены известные проблемы, реальные возможности и степень адекватности тектонофизического моделирования в связи с краткосрочным прогнозированием сильных землетрясений [Наймарк, 1997, 2009]. На примерах применения конкретных методов показано [Короновский, Наймарк, 2013], как возникают и проявляются неустойчивость, бифуркационность нелинейного процесса и фрактальность среды, как и почему это приводит к непредсказуемости или нереконструируемости изучаемого процесса. Показана неубедительность объяснений неудач прогноза почти исключительно недостаточной изученностью, обоснован вывод о бесперспективности дальнейших подобных попыток.

Учитывая нелинейность, сильную неравновесность геодинамических систем, грубодискретную фрактальность геосреды, бифуркационность процессов деформирования и разрушения, следует ожидать существенную хаотичность сейсмического режима. Надежному и точному прогнозированию препятствует то, что не может быть даже одной пары идентичных предвестников, чтобы успешный прогноз по одному из них повторился бы и по второму — малейшие различия предвестников оказываются существенны для прогнозирования, обрекая повторный, аналогичный прогноз на неудачу (подробнее об этом см. ниже).

В активно развиваемой дегазационной концепции ключевую проблему краткосрочного сейсмопрогнозирования, по И.Л. Гуфельду, составляет недетерминированность сейсмического процесса:

даже диагностировав наступление периода опасности, едва ли можно оценить вероятность и магнитуду ожидаемого события. Рекомендации по выделению и использованию предвестников на основе результатов лабораторного физического моделирования оказались несостоятельны. Представления о фрактальности геосреды и о сейсмическом процессе как динамическом хаосе оцениваются И.Л. Гуфельдом как интересные, но не раскрывающие того, что происходит в среде, почему она ведет себя так, а не иначе; поэтому обсуждения качества будущих прогнозов преждевременны. Главное, по И.Л. Гуфельду, — изучая в реальной геосреде реальное пространственное распределение реальной сейсмичности, научиться надежно распознавать переход от фонового режима к предкритическому, а также выделять эпицентрально-зону ожидаемого события.

Приблизит ли реализация такой программы к достижению надежного и точного краткосрочного прогнозирования рассмотрим ниже.

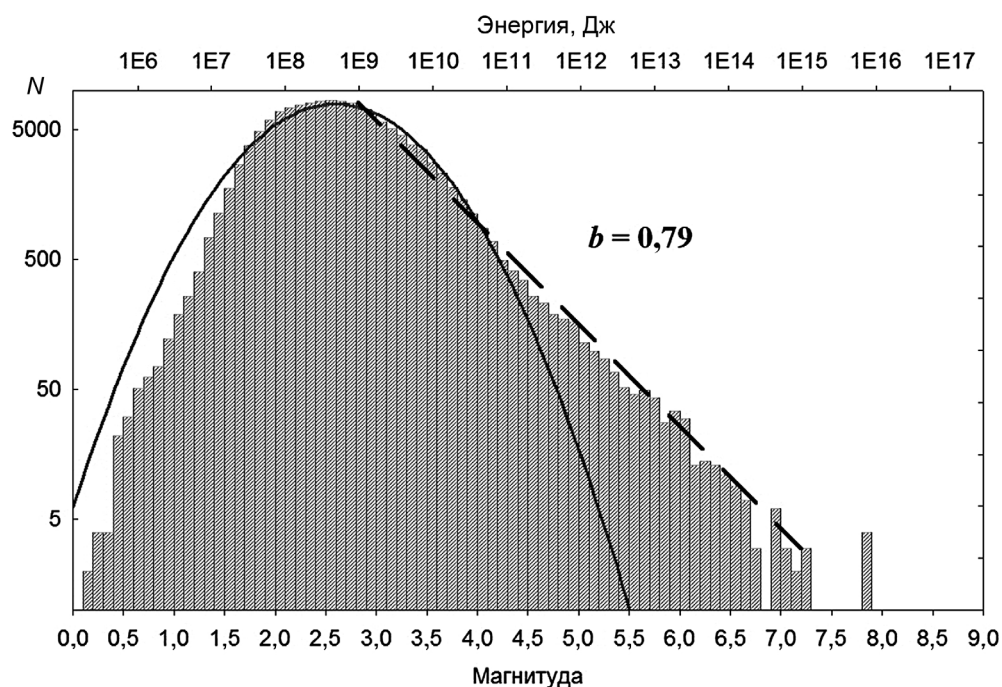
Фундаментальные факторы непрогнозируемости.

Возможность позитивного или негативного решения обсуждаемой проблемы определяется характеристиками сейсмического процесса как линейного или нелинейного, обладающего свойствами самоподобия или нет, чувствительного или нет к начальным условиям, детерминированного или стохастического, регулярного или хаотического. Та или иная из этих характеристик принимается не на основе тех или иных гипотез о природе процесса, а по результатам анализа статистических распределений и временных рядов уже произошедших землетрясений и существующих структур. Это предопределяет реалистичность и объективность получаемых заключений.

В дегазационной концепции сейсмический процесс определяется как недетерминированный. Что конкретно это должно означать в свете вышеперечисленных альтернатив? Ответы на этот и нижеследующие подобные вопросы дают результаты фрактального и динамического анализа геодинамических систем [Захаров, 2014], там же см. обзор литературы по этой теме.

Для *линейных* динамических систем характерно детерминированное поведение, при котором задание некоторого начального состояния системы определяет единственное решение для любого момента как в будущем (прогноз), так и в прошлом (ретрогноз). При этом вариации начальных условий и/или параметров системы, конечно, влияют на результат (точность прогноза), но влияние это также носит линейный характер, что дает возможность осуществлять детерминированный прогноз с приемлемой точностью даже при неточном задании исходных данных и параметров системы.

При стохастическом воздействии множества взаимно независимых факторов неоднозначное задание случайно варьирующего начального состоя-



Распределение числа землетрясений по магнитуде (энергии) для Японии по каталогу JMA за 1973–2007 гг., график повторяемости (штриховая линия) и оценка параметра b в законе Гутенберга–Рихтера. Здесь же сплошной линией показано нормальное распределение с теми же средним и дисперсией

ния и параметров, нарушая возможность детерминированного прогноза, тем не менее статистически детерминирует вероятностное, среднее решение для любого достаточно длительного отрезка времени в прошлом или будущем. Это выражается нормальным Гауссовым (или связанным с ним) статистическим распределением разномасштабных событий или структурных элементов. При этом среднее значение, совпадая с модой и медианой распределения (или приближаясь к ним), еще и является *характерным*, показательным для рассматриваемого набора данных, поэтому оно может использоваться в качестве характеристики этого набора, а «хвосты» распределения убывают так быстро, что ими можно пренебречь. В этом случае малые неточности в задании начального состояния несильно меняют прогнозируемую вероятность численно преобладающих средних событий (например, землетрясений, если бы их статистика носила такой характер), в то же время «большие» события (сильные землетрясения), вероятность которых значительно отклоняется от среднего значения, можно считать пренебрежимо редкими.

В отличие от предыдущего, нелинейным динамическим системам свойственна сильная зависимость их поведения от малейших вариаций начального состояния и/или параметров. Следствие этого — экспоненциальное разбегание исходно близких траекторий динамики. Кроме того, при достижении некоторых критических значений управляющего параметра происходят неоднократные потери устойчивости с переключениями (*бифуркациями*) в другой теоретически равновозможный, но качественно отличающийся режим. Из-за неабсолютно точно заданных начальных условий координаты точки бифуркации оказываются непрогнозируемыми, как и «выбор»

варианта бифуркационного переключения, при любой практически достижимой детальности и точности изучения. Система проявляет внешние свойства хаотического поведения, хотя в ней нет элемента случайности. Такое свойство называется *детерминированным хаосом*. Поведение таких систем нерегулярно, но отличается от полностью случайного истинного (*стохастического*) хаоса. В результате для таких систем характерны непредсказуемость и необратимость, т.е. очень сильная ограниченность или даже невозможность как прогноза, так и ретрогноза..

Детерминированный хаос порождает степенные законы распределений, которые являются «флагом» детерминировано-хаотических систем, а значения их параметров позволяют выявлять свойства этих систем. Степенные распределения имеют свойства, существенно отличающиеся от нормального: среднее значение не совпадает ни с модой, ни с медианой. В наборах данных, имеющих степенное распределение, например размеров разрывных нарушений, энергии землетрясений (см., например, [Захаров, 2014], и ссылки в этой работе), ограниченных сверху, среднее практически определяется наибольшим членом для сколь угодно больших выборок [Писаренко, Родкин, 2007], Пример степенного распределения землетрясений по энергии и отличие его от нормального представлен на рисунке. Добавление одной большой величины смещает среднее значение вправо, замедляя падение «хвоста» графика распределения. «Большие» объекты (или события) встречаются чаще, поэтому ими пренебречь уже нельзя, как в случае нормального распределения.

Фундаментальное основание для появления степенных законов — *критические* (на грани стабильности) состояния, когда небольшое воз-

действие может перевести систему в хаотический режим. Существуют системы, которые поддерживают нахождение в критическом состоянии за счет самоорганизации, в этом случае говорят о *самоорганизованной критичности* (СОК).

В исследованиях структуры и динамики нелинейных процессов в литосфере, в том числе катастрофических, таких, как землетрясения, статистические распределения по степенному закону типичны, что указывает на их самоподобие (фрактальность). Приведем кратко результаты, описанные в [Захаров, 2014].

Степенное распределение геоблоков по размерам в широком диапазоне масштаба — от зерен до плит — указывает на самоподобие блоковой делимости Земли (как блоков, так и разделяющих их разрывных нарушений) как иерархии с возрастанием размеров в геометрической прогрессии с показателем 2–5 (в среднем $3,5 \pm 0,9$), независимо ни от свойств, ни от способа образования объектов.

Единый степенной закон для распределения плит и блоков указывает на их самоподобную иерархию от самых крупных до самых мелких; при этом собственная иерархия выявляется и у межблоковых зон. Внутриплитные напряжения — следствие взаимодействия плит и глобальной динамики. При превышении пределов прочности среда разрушается по упруго-хрупкому или по вязко-пластическому механизму с появлением разномасштабных разрывов и блоков с фрактальными свойствами.

На основании анализа характеристик самоподобия сейсмического процесса, выражающихся в параметрах степенных законов (закон Гутенберга–Рихтера, закон Омори, закон фрактальных распределений очагов землетрясений и разломов) и динамических характеристиках временных рядов сейсмичности и рядов смещений пунктов GPS (после удаления трендов), установлена согласованность иерархических свойств (фрактальная размерность эпицентров землетрясений и активных разломов, параметра b в законе Гутенберга–Рихтера) сейсмотектонической системы. Это указывает на то, что сейсмотектоническая система, их породившая, — не стохастическая, а в некоторой степени детерминированная, и при этом противоречит представлениям о периодичности (полном детерминизме) сильных землетрясений. При этом в совокупностях со степенными распределениями структурных элементов и сейсмических событий нет каких-либо выделенных характерных размеров.

Таким образом, характеристика сейсмического процесса как стохастического (случайного) не соответствует фактическим данным. Детерминированная динамика нестохастической системы воспринимается как хаотическая и оказывается практически непредсказуемой. Единственное надежное и точное прогнозное решение получалось бы только при абстрактно мыслимом, но прак-

тически невозможном «абсолютно точном» задании начального состояния. Точнее, возможный диапазон неточностей при задании начального состояния и/или параметров для «удачного» прогноза существует, так же, как и горизонт прогноза, но они тоже не определены — именно вследствие детерминировано-хаотического характера системы и возможной близости системы к точкам бифуркации, положение которых тоже точно неизвестно.

Для нелинейного взаимодействия флюидных потоков и тектонического деформирования характерна сильная зависимость от параметров системы (например, PT -условий), когда возможны лавинность и катастрофы под триггерным воздействием.

Необходимые в прогнозировании понятия «фоновая» и «критическая сейсмичность», «форшоки» и «основные» события предполагают наличие некоторых выделенных уровней. Но при самоподобию сейсмического процесса на событие некоторой магнитуды приходится определенное число более слабых событий в широком диапазоне магнитуды и без каких-либо особенных выделенных уровней. При однородном степенном законе корректная классификация по величине, размеру, силе, энергии невозможна.

Именно детерминированно-хаотическими свойствами сейсмотектонической системы объясняются ситуации, когда некоторые однотипные, сходные по интенсивности и размерам аномалии могут оказываться предвестниками событий разной энергии, происшедших спустя разное время и на весьма разном удалении от прогнозного эпицентра. Здесь неожиданная для наблюдателя «беспричинность» неоднозначности соотношений — кажущаяся. Уточним метафору И.Л. Нерсесова: на «визитках» разных форшоков соответствующие разные прогнозы записаны точно, но так тонко и мелко (практически бесконечно), что мы не можем их различить.

На основании фрактального и динамического анализа сейсмотектонических систем на разных пространственно-временных масштабах (тысячи километров и десятки лет при анализе сейсмичности и разломов, сотни–тысячи километров и годы при анализе рядов выделения сейсмической энергии, сотни километров и месяцы для афтершоковых процессов) установлено согласованное самоподобие сейсмотектонического процесса во времени, в пространстве и по энергии, что выражается в степенных законах, его характеризующих. Сейсмотектоническая система относится к классу детерминировано-хаотических систем с самоорганизованной критичностью и хаотическим поведением, для которых ограниченность прогноза состояний и динамики носит принципиальный характер [Захаров, 2014].

Именно в этом, а не в недостаточности наблюдательных данных, заключается главная причина ненадежности сейсмического прогнозирования

[Короновский, Наймарк, 2009, 2012; Наймарк, Захаров, 2012]. Сам механизм подготовки сейсмического события таков, что порождает непредсказуемую хаотическую динамику.

Заключение. Необходимые научные предпосылки для адекватного решения рассматриваемой проблемы появились давно: 1901 г. — А.М. Ляпунов — теория устойчивости динамических систем, разбегание исходно близких траекторий, показатели Ляпунова; 1945 г. — Б. Гутенберг, Ч. Рихтер — закон повторяемости землетрясений; 1961 г. — Э. Лоренц — ляпуновские разбегания в прогнозах погоды, странный аттрактор, динамический хаос, «эффект бабочки»; 1975 г. — Б. Мандельброт — фрактальная геометрия природы; 1987–1989 гг. — П. Бак — самоорганизованная критичность (СОК) и сейсмичность как ее проявление. Дискуссии о возможности и путях достижения полноценных краткосрочных прогнозов сильных землетрясений начались более полувека назад и, вероятно, еще будут продолжаться. Но мы убеждены, что эта проблема уже подошла к своему решению: надежный и точный прогноз сильных землетрясений невозможен.

История проблемы включает весьма драматичный момент: фиаско прогнозной стратегии, основанной на двух фундаментальных, но не оправдавшихся гипотезах. Предвестники как естественные и по определению якобы надежные сигналы о предстоящих бедствиях демонстрируют индивидуальную и совместную изменчивость соотношений с реальными сейсмическими событиями. Естественнонаучные гипотезы механизмов сейсмичности как эвристические ориентиры (по определению), якобы прямо нацеленные на позитивное решение проблемы, предлагают лишь весьма общие, взаимно противоречащие предположения, не сулящие результатов, которые удовлетворяют требованиям практики к краткосрочным прогнозам.

Причины такой дискредитации, независимые ни от опыта и квалификации исследователей, ни от дефектов методик, ни от недостаточности технического оснащения или финансирования исследований, неустранимы и носят принципиальный характер. Однозначный ответ на вопрос о возможности краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений получен не благодаря, а «в обход» геофизических гипотез, т.е. не на традиционной основе предположений о механизмах и предвестниках, а путем современного фрактального и динамического анализа структур и процессов в литосфере по конкретным данным о характере статистических распределений реальных элементов геосреды и фактических событий. Из сказанного выше следует, что разработанность теоретико-методических основ такого анализа позволяла в принципе начать его широкое применение значительно раньше. В поисках конкретных ответов на главные вопросы: реализовано ли устойчивое качественное краткосрочное

прогнозирование сильных землетрясений, а если нет, то возможно ли это в будущем, приоритетно именно фрактальное и динамическое анализирование структур и состояний геосистем. Объяснять в категориях геологии, геофизики, геохимии, как и почему «все происходит так, а не иначе» — дело естественнонаучных гипотез.

При этом никакие уже существующие или возможные будущие гипотезы о механизмах подготовки землетрясений не опровергнут независимо от них полученные выводы о нелинейности, самоподобии сейсмического процесса и о фрактальности геосреды. А это именно те факторы, которые определяют непредсказуемость отдельных событий в геодинамическом хаосе.

В предвидении возможных последующих дискуссий приведем основные положения нашей позиции относительно обсуждаемой проблемы.

1. Предупреждения о краткосрочной сейсмической опасности должны быть достаточно точным и надежными, иначе они не будут отвечать своему предназначению. Жесткие допуски по точности и надежности краткосрочного прогноза — важнейшее непереносимое условие и критерий его адекватности и практической применимости.

2. Сейсмический процесс нелинеен, чрезвычайно «чувствителен» к малейшим неточностям в характеристиках любого предвестника и условиям его появления, что заведомо исключает возможность повышения эффективности прогнозирования при любой реальной детальности изучения. Невозможно зафиксировать некоторый предвестник в качестве эталона для того, чтобы — по аналогии — точно предсказать землетрясение определенной энергии в определенном месте и в определенное время. Успешные краткосрочные прогнозы единичны и существенно случайны.

3. В фрактальной геосреде выделение форшоков и главных событий, фоновых и аномальных структур и состояний заведомо всегда проблематично, независимо от каких-либо гипотетических механизмов сейсмичности.

4. Устойчивое полноценное краткосрочное прогнозирование требует задания начальных условий не менее чем с «абсолютной» точностью, что невозможно. Такой прогноз в принципе нереален.

5. Хорошие прогнозные методики должны давать хорошие прогнозы. К настоящему времени все без исключения примеры успешного краткосрочного прогнозирования землетрясений — случаи нерепрезентативного, локального кратковременного успеха или/и результаты прогнозирования с точностью, не удовлетворяющей требованиям практики. При этом игнорируются теоретические обоснования принципиальной невозможности полного, надежного и точного краткосрочного прогнозирования.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов М.В. Родкина и Н.А. Сергееву за тщательный анализ рукописи и критические замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гуфельд И.Л. Сейсмическая опасность: предотвратить или предупредить. М.: Onebook.ru, 2019. 98 с.
- Захаров В.С. Анализ характеристик самоподобия сейсмичности и систем активных разломов Евразии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 6. С. 10–17.
- Захаров В.С. Динамические характеристики временных рядов GPS и их связь с сеймотектоническими особенностями региона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 3. С. 29–37.
- Захаров В.С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: Автореф. докт. дисс. М., 2014. 35 с.
- Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 3. С. 3–12.
- Короновский Н.В., Наймарк А.А. Прогноз землетрясений — реальная научная перспектива или вызов науке? // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 1. С. 12–22.
- Короновский Н.В., Наймарк А.А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 6. С. 3–10.
- Короновский Н.В., Наймарк А.А. Методы динамической геологии на критическом рубеже применимости // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Т. 1, № 21. С. 152–162.
- Любушин А.А. Прогностические свойства случайных флуктуаций геофизических характеристик // Междисциплинар. науч. и прикладной журн. «Биосфера». 2014. Т. 6, № 4. С. 319–338.
- Наймарк А.А. Фрактальность геологической среды и проблема прогнозируемости сейсмогенного макроскалывания // Изв. вузов. Геология и разведка. 1997. № 2. С. 23–31.
- Наймарк А.А. Эволюция геодинамических систем: хаос или порядок? // Изв. вузов. Геология и разведка. 1998а. № 1. С. 11–17.
- Наймарк А.А. Реверс-каскадная модель процесса разрывообразования и структурные парагенезы // Изв. вузов. Геология и разведка. 1998б. № 3. С. 3–9.
- Наймарк А.А. Физический механизм и проблема прогнозируемости сейсмогенного макроскалывания в структурированной среде (теоретические аспекты) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1998в. № 4. С. 20–26.
- Наймарк А.А. Нелинейная динамика: опровержение постулата прогнозируемости? (к новой парадигме геологии) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2000. № 6. С. 10–17.
- Наймарк А.А. К теории сейсмогенного макроскалывания // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2001. № 4. С. 3–8.
- Наймарк А.А. Сценарий возникновения тектонодинамического детерминистского хаоса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2003. № 5. С. 22–31.
- Наймарк А.А. Грубодискретная фрактальность геологической среды и проблемы тектонофизического моделирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 5. С. 3–11.
- Наймарк А.А., Захаров В.С. О соотношениях направленности, цикличности и нелинейности в геологических процессах // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. Т. 1, № 19. С. 181–190.
- Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990. 144 с.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф. М.: ГЕОС, 2007. 242 с.
- Geller R.J., Jakson D.D., Kagan Y.Y., Mulrgia F. Earthquakes cannot be predicted // Science. 1997. Vol. 275. P. 1616–1617.

Поступила в редакцию 27.01.2021

Поступила с доработки 28.01.2021

Принята к публикации 29.01.2021