

УДК 550.343

Н.В. Короновский¹, В.С. Захаров², А.А. Наймарк³**КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ:
РЕАЛЬНОСТЬ, НАУЧНАЯ ПЕРСПЕКТИВА ИЛИ ПРОЕКТ-ФАНТОМ?***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1**Moscow State University, Faculty of Geology. 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Проанализированы современное состояние, результаты и возможные перспективы краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений. На примерах конкретных исследований показано, что такая прогнозируемость с требуемой полнотой, точностью и надежностью не реализована и не ожидаема в будущем. Это фундаментальное следствие нелинейности сейсмогеодинамических систем, функционирующих детерминированно-хаотически во фрактальной геосреде. Эффективность прогнозирования — отношение числа успешно предсказанных землетрясений к числу зарегистрированных на некоторой определенной площади — не выше нескольких процентов. Нередкие сообщения о якобы достигнутой почти 100%-ной эффективной краткосрочной прогнозируемости опровергаются как отсутствием соответствующих надежных методик, так и неуклонным пополнением перечня все новых непредсказанных сейсмокатастроф.

Ключевые слова: сильные землетрясения, краткосрочный прогноз, эффективность прогнозирования, нелинейная геосистема, фрактальная геосреда, динамический хаос.

The modern conditions, the received results and possible prospects of short-term forecasting of strong earthquakes are analysed. On examples of concrete researches it is shown, that such forecast with a required detail, accuracy and reliability is not carried, and is not expected in the future. It is fundamental consequence of nonlinearity of the seismic geodynamic systems functioning deterministically-chaotically in the fractal geologic medium. Effectiveness of forecasting in the form of attitude of number of successfully predicted earthquakes to number of registered ones on some certain area is not above several percent. Frequent messages about ostensibly reached almost 100%-s' of effective short-term forecasting are denied by absence of adequate reliable methods, and by steady extension of the list of the not predicted seismic catastrophes.

Key words: strong earthquakes, the short-term forecast, a forecasting effectiveness, nonlinear geosystem, fractal geomedium, dynamic chaos.

Введение. С каждым годом происходит все более впечатляющее число только сильнейших непредсказанных землетрясений (более 50 в 2016–2018 гг.), например: Аляска, М7,1; Камчатка, М7,0; вблизи о. Суматра, М7,8; Япония, М7,3; Эквадор, М7,8; Новая Зеландия, М7,9; Япония, М7,4; Китай, М7,0; Мексика, М8,2; 7,1; Иран, М7,3; Перу, М7,3; Аляска, М8,0; Мексика, М7,2; Папуа-Новая Гвинея, М7,2; Индонезия, М7,0; Венесуэла, М7,3; Фиджи, М8,2; 8,1, и др., это очевидное отрицание реальности краткосрочного прогноза.

Но дискуссия о реальности таких прогнозов в будущем, начатая четверть века назад [Bak, Tang, 1989; Geller et al., 1997; Huang, Turcotte, 1990], длится без надежды на скорое завершение. Ожидающим близкую возможность прогнозов противостоят как убежденные в их принципиальной нереализуемости, так и те, кто настойчиво

афиширует якобы уже полученные почти достоверные предсказания (~100%).

Неоднозначность ситуации побуждает обсудить ее возможные причины. Одинаково ли понимают специфику краткосрочного прогноза? Какие требования и почему они должны предъявляться к прогнозу, выполнимы ли они, адекватны ли этим требованиям и запросам практики прогнозные заключения, традиционно относимые к краткосрочным? Удовлетворяют ли нас прогнозы точные, но маловероятные, или вполне надежные, но недостаточно точные?

Ясно, что при любом уровне изученности повышение надежности прогноза снижает его точность и наоборот (своеобразное проявление действия принципа неопределенности). Но практически применимый прогноз должен быть точен и надежен одновременно, притом не в достаточ-

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, университет «Дубна», кафедра общей и прикладной геофизики, профессор, доктор 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: fhaim@ya.ru

ной степени и не отчасти, а полностью — по трем параметрам, иначе он практически бесполезен. Рассмотрим это подробнее.

Требования, отвечающие специфике краткосрочного прогноза. Что такое *точность*, *надежность*, в чем выражается их *достаточность*? Неоднозначность толкований смысла этих понятий — причина многих недоразумений в понимании специфики и реальных возможностей краткосрочного прогнозирования.

Краткосрочный прогноз, в отличие от долгосрочного и среднесрочного, задает *конкретные* условия, в которых должны быть заблаговременно назначены и своевременно предприняты соответствующие *конкретные, неотложные* меры для предотвращения и/или минимизации людских потерь и материального ущерба в ожидании *конкретной* прогнозируемой катастрофы. Это диктует конкретные значения допустимых погрешностей, определяющих *достаточную точность* прогнозирования по тем или иным предвестникам места, энергии и времени будущего землетрясения.

Место определяется (по разным источникам в весьма широком диапазоне значений) координатами *эпицентра* и радиусом круговой *эпицентральной зоны* (R). Полагая, что на местности круги диаметром 60 км приблизительно соответствуют территориям крупных городов (Рим 20×20 км, Пекин 50×50 км, Токио 25×100 км, Мехико 40×50 км), целесообразно принять, что $R = 30$ км, а допустимую погрешность прогноза места эпицентра, соответственно, в ± 30 км.

На практике в ходе такого прогнозирования контролируют («сканируют») намного большую, как правило, не строго ограниченную площадь. Введем для ее обозначения новое понятие: *сектор прогнозной ответственности* (СПО) — пространство, где можно ожидать и нужно предвидеть проявления сейсмичности. Местоположение, границы и размеры этой площади — район, область (провинция), сейсмоактивная зона, страна, континент, полушарие, планета — должны быть заданы заранее и указаны в прогнозе достаточно определенно. Получив для конкретного СПО в некотором интервале времени отношение числа успешно предсказанных землетрясений к числу зарегистрированных, можно оценить эффективность применения избранных предвестников, методов прогнозирования и корректность полученных результатов.

Энергию, выделяемую при землетрясениях, характеризуют чаще всего *магнитудой* (M). Поскольку магнитуда пропорциональна логарифму энергии землетрясения, то от меньших магнитуд к большим *точность* их регистрации повышают, а допустимую погрешность, соответственно, изменяют от ± 1 до $\pm 0,1$. Пороговую магнитуду в прогнозах сильных землетрясений принимают равной $5,5 \pm 0,5$.

Время, т.е. *дата* возможного землетрясения прогнозируется, по разным источникам, также в весьма широком интервале значений. Допустимой погрешностью целесообразно считать ± 3 сут., в соответствии с тем, что не только крупные города, но и средней величины, не могут долго находиться в состоянии высокой готовности к мощному толчку. По той же причине, с учетом возможных оперативных уточнений, прогноз нужно выдать незадолго до события, но не слишком поздно, чтобы успеть оповестить население, провести эвакуацию, остановить работу предприятий, мобилизовать службы спасения и т.п. Поэтому необходимо установить, кроме даты, еще и *достаточное упреждение* (опережение) прогноза в диапазоне 0,5–3 сут. до ожидаемого события. Если прогнозируемое ожидание оценивается неделями или месяцами, превентивные меры безопасности, очевидно, должны будут носить более общий, среднесрочный характер.

Именно *априорно* (заранее) установленным требованиям должна отвечать и в момент выдачи официально документироваться формулировка прогноза. И именно эту изначальную формулировку будет необходимо сравнивать с описанием реального события для оценки эффективности примененного метода прогнозирования. Любые *апостериорные* уточнения формулировки, в частности привлечение дополнительных предвестников (фактически с переходом к ретроспективному прогнозированию, задним числом), недопустимы. Только соответствие этим требованиям и только полные, по трем параметрам, *совпадения* прогнозных и реальных характеристик события делают прогноз *успешным* (адекватным, практически применимым). Любые *несоответствия* прогноза и реальности по полноте и точности (сверх допустимых погрешностей) нужно рассматривать как *ошибки* прогнозирования.

По характеру несоответствий выделяют два типа ошибок: а) финансово затратная, но неопасная *ложная тревога*, если прогноз содержал завышенную магнитуду, заниженное время толчка, т.е. в реальности событие меньшей мощности произошло в прогнозное время или позже, или не произошло вовсе, жертв и разрушений нет; б) особо опасная ошибка, т.е. *пропуск цели*, если прогноза не было или он содержал заниженную магнитуду, завышенное время толчка, т.е. событие большей мощности произошло в прогнозное время или раньше, а жертвы и разрушения велики.

Результативность прогнозирования некоторые авторы (см. ниже) характеризуют *подтвержденностью прогнозов*. Это доля (иногда большая, до 100%) успешных прогнозов в числе заявленных (обычно немногих), поскольку на практике прогнозируемы лишь редкие землетрясения. При этом такой важнейший показатель, как множество непредсказанных землетрясений, не учитывается. Более адекватная характеристика — *эффективность*

(или *надежность*) прогнозирования: отношение числа успешно предсказанных землетрясений к числу зарегистрированных за время исследований в диапазоне магнитуды $5,5 \pm 0,5$ и выше в границах заданного СПО. Полученная таким образом оценка эффективности могла бы совпасть с подтвержденностью прогнозов только при значительной и существенно близкой к численности происшедших землетрясений и заявленных прогнозов, что на практике никогда не случалось. Реальное практическое значение «многообещающей» 100%-ной подтвержденности прогнозов проявляется только при сопоставлении с численностью и процентом непредсказанных землетрясений из числа зарегистрированных.

Достаточной эффективностью прогнозирования целесообразно считать удовлетворяющий практическим нуждам диапазон вероятностей, в котором прогнозы ожидаемых событий подтверждаются с заданной точностью. Учитывая чрезвычайно высокую ответственность за своевременное объявление тревоги, в качестве показателя достаточной надежности краткосрочного прогнозирования уместно было бы принять получение не менее 85–90% успешных прогнозов при 10–15% ошибок типа «ложная тревога» и «пропуск цели» в достаточном (представительном) множестве землетрясений. Но, как покажем далее, *практически достигаемая* эффективность не превышает нескольких процентов. Вопрос о том, достижима или нет на практике и в принципе требуемая высокая надежность прогнозов остается предметом острых дискуссий и подробно обсуждается далее. Не стремясь преждевременно выдавать указанные требования за общепризнанные, примем их в качестве исходных позиций для анализа и оценки состояния рассматриваемой проблемы. На примерах, отражающих различные точки зрения, кратко рассмотрим принятые разными авторами исходные положения, примененные подходы, методы прогнозирования и полученные результаты.

Состояние проблемы: достижения, перспективы, новые вопросы. Согласно [Гуфельд и др., 2011], удовлетворительного краткосрочного прогноза сильных землетрясений до сих пор нет. Обычно при построении прогноза возмущение любого из параметров геосреды *ретроспективно* относят к наиболее сильному событию, даже если менее сильное в этот период происходило ближе. На каком основании в подобных случаях некоторое конкретное возмущение соотносят с конкретным землетрясением, если каких-либо независимых подтверждений этого нет, — не разъясняют. При этом коэффициент корреляции в соотношениях *реальных* землетрясений с $M > 4$ и тестовых возмущений, которые имеют *случайные* координаты и время проявления, достигает 0,7 и более. Получается, что возмущения любого параметра среды можно принять за предвестник. Между тем, многие

возмущения не реагируют на изменения напряженного состояния среды; бывает, что длительное региональное возмущение затухает, а крупный разрыв там возникнет через год–два. В итоге оценки сейсмоопасности по времени и месту ненадежны и неточны.

По [Родкин, 2008], степенное соотношение числа и силы землетрясений (закон Гутенберга–Рихтера) указывает на критическое (или близкритическое) состояние сейсмогеодинамической системы, эволюция которой чрезвычайно зависима от малейших воздействий, порождающих разномасштабные события, непредсказуемые по месту, времени и силе. В этих условиях вероятностные оценки не удовлетворяют жестким требованиям краткосрочного прогноза. Из многочисленных данных о состоянии геосреды надежно и точно выделить сигнал о времени, месте и силе будущей сейсмोकатастрофы не удастся.

В работе [Бобровский, 2016] на основании изучения геоэлектрических процессов на границе тектоносфера–атмосфера на интервале оперативного упреждения ряда землетрясений (Аляска, $M_{7,1}$, 24.01.2016; Камчатка, $M_{7,2}$, 30.01.2016), в 2001–2015 гг. в Евразии (от 42° до 56° с.ш., от 14° до 159° в.д.) показано, что аномальные нестационарные геосигналы (НГС) выявляются, но регистрируются не на всех линиях одной станции, где проводится регистрация, и не синхронны на разных линиях, а в региональной сети синхронные сигналы могут отсутствовать. НГС-предвестники наблюдаются, но величину порогового значения нужно подбирать ретроспективно и уточнять в дальнейшем. Отсюда следует множество ложных тревог и существенных трудностей с выделением (на фоне помех) аномалий теллурических потенциалов, порожденных внешними и внутриземными источниками, поэтому успешных краткосрочных прогнозов сильных землетрясений нет.

По данным [Гаврилов и др., 2006], в результате непрерывного долговременного мониторинга на Камчатке установлено, что наблюдения регионального масштаба не дают оснований ожидать значительное и надежное сокращение времени тревоги. По наблюдениям на одном измерительном пункте достаточно надежны только общие краткосрочные оценки сейсмоопасности для зоны с радиусом 300–500 км от пункта наблюдений.

По данным [Кочкин, Петров, 2015], следствием крайней редкости сильнейших землетрясений, когда закон больших чисел не действует, является необоснованность корректности и достаточной представительности наблюдательных данных и получаемых результатов. После каждого сейсмогенного разрыва параметры нового сейсмического цикла отличны от предыдущих, что может резко и неустранимо повлиять на адекватность принятой модели. В любой момент — в точке бифуркации, которая заранее неизвестна, — про-

пространственно-временная организация системы может измениться так, что малая неточность исходных данных быстро возрастет до огромной неопределенности в прогнозе. Но динамический хаос на микроуровне может порождать макропорядоченность. Так, под действием устойчивых геодинамических сил в пределах определенного сейсмического пояса возникает сейсмический цикл (что, заметим, не обеспечивает получение точных и надежных краткосрочных прогнозов).

По данным [Любушин, 2014], попытки прогнозировать будущие сильные события по особенностям слабых перед прошлыми сильными событиями безуспешны даже там, где, как, например, в Японии, ведутся длительные, детальные и тщательные наблюдения. Тем не менее появление крупного консолидированного (по тем или иным параметрам) блока геосреды А.А. Любушин рассматривает как признак близкого скачкообразного перехода системы к качественно иному состоянию — признак приближения к сильному землетрясению.

В апреле 2010 г. для Японии этот автор заявил прогноз: землетрясение с $M=8,5\div 9,0$ в июле 2010 г.; место будущей катастрофы намечилось, причем, как выяснилось постфактум, еще в 1997 г. Событие с $M9,0$ произошло только 11 марта 2011 г. (Великое японское землетрясение — ВЯЗ), т.е. на 9 месяцев позже заявленного срока, как реализация, но не краткосрочного, а среднесрочного прогноза. Вскоре после этого А.А. Любушин предположил подготовку в том же районе еще одной не менее мощной катастрофы, но ее ожидание длится уже более 7 лет. Другие сильные землетрясения в Японии с магнитудой 6,3 и 7,3 (2016 г.), а также 6,2 и 6,1 (2018 г.) не были предсказаны.

Выводы А.А. Любушина: определение времени события — самый сложный вопрос: «Толчком к критическому явлению может быть самое незначительное и случайное событие, которое <...> практически невозможно спрогнозировать» [Любушин, 2014, с. 332], это могут быть электромагнитная буря, тайфун, волны от удаленного землетрясения, приливные деформации земной коры. Анализировать следует не медленное движение тектонических плит, а их «дрожь» — GPS-шум (рисунок): в области будущей сейсмической катастрофы блоки «дрожат» некоторым особым образом [Lyubushin, 2018]. Но, заметим: насколько устойчивой во времени будет эффективность такого (или любого иного) предвестника в дальнейшем, заранее неизвестно.

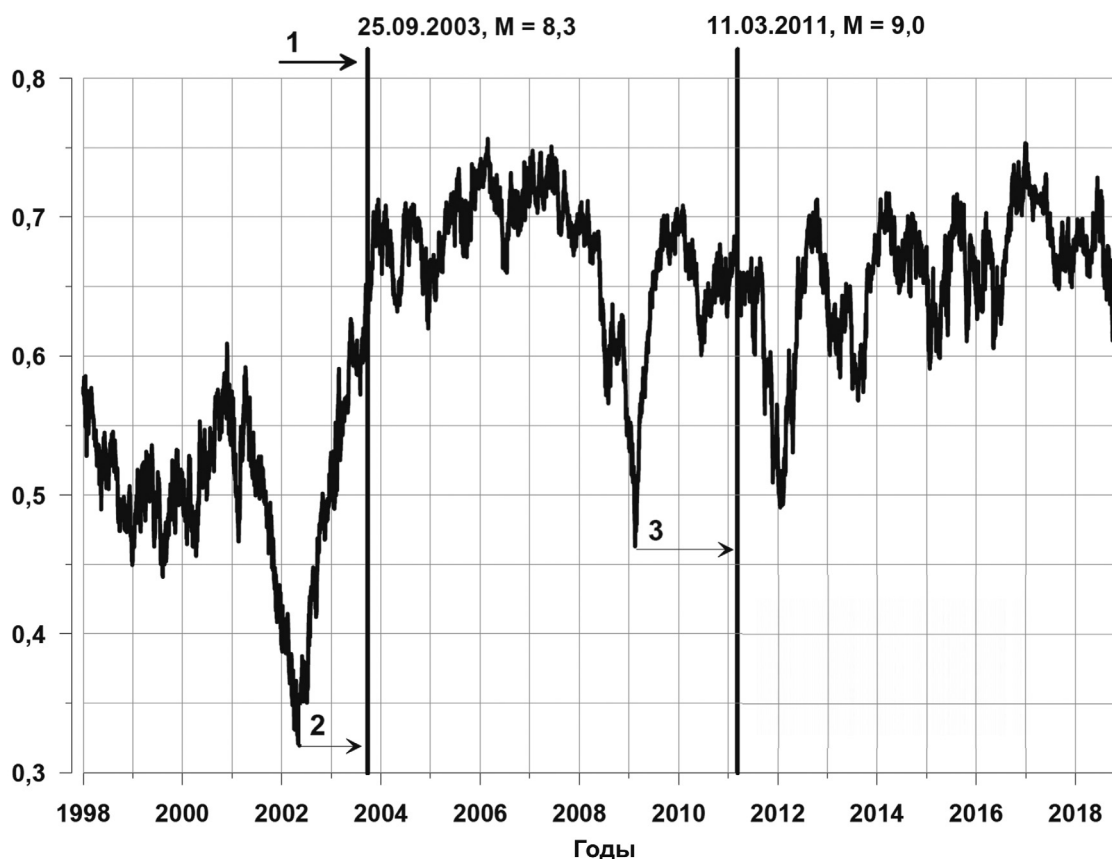
По [Шуман, 2014], типовая схема исследования динамики сложных систем, в том числе геосреды, строится на основе общих принципов их эволюции. Но общепризнанная механическая модель сейсмопроцесса на основе универсальных подходов пока не предложена. Выбор переменных, удобных для измерений и достаточных для

динамического описания, их адекватное усреднение, оптимальное построение пространства динамических переменных эмпирической модели по пространственно-распределенным экспериментальным данным, — все это реализуемо, если размерность динамических систем (число переменных, описывающих состояние системы) не очень большая, а характерные временные масштабы различаются не очень сильно.

Эффективность моделирования сильно ограничена отсутствием необходимых данных и соответствующих технологий исследования геосреды с достаточным пространственным и временным разрешением. В реальной геосреде под действием флюидов (а также иных факторов) на разных пространственных масштабах изменяются свойства элементов и параметры контактного взаимодействия в граничных структурах и внутри блоков. Это может коренным образом менять геотектонические условия, влияя на характер сейсмического процесса. Все это, отмечает В.Н. Шуман, а также разная степень нелинейности подсистем в иерархической структуре геосреды резко осложняют или даже закрывают возможности традиционных подходов к моделированию ее динамики.

При этом В.Н. Шуман парадоксально расценивает представления о невозможности краткосрочного прогнозирования как отзвук «устаревших идей конца прошлого века» о непредсказуемости систем с масштабной инвариантностью. Прогнозирование, по крайней мере вероятностное, по его мнению, в принципе осуществимо, «теоретически невозможный» прогноз на деле оказывается «иногда отчасти реализуемым». Фундаментальные свойства геосистем: с приближением к событию — аномальный рост сейсмических флуктуаций и понижение частоты колебания некоторых мод, эффекты синхронизации, увеличение крупномасштабных флуктуаций при подавлении мелко-масштабных, наличие локальных зон затишья и формирование цугов медленных деформационных фронтов, обнаруживаемых экспериментально. Немногочисленные пока успешные попытки прогноза вписываются в эту схему, вселяя определенный оптимизм, так что, по мнению указанного автора, проблема предсказуемости землетрясений отнюдь не безнадежна. Трудности будут преодолены, скорее всего, при выполнении конкретных проектов, а не решением проблем «в рамках старых идей». Вместе с тем автор признает, что достаточно надежные предвестники могут быть получены лишь из теоретических представлений о физике процесса.

По [Гульельми и др., 2014], анализ форшоковой активизации (1964–2009 гг.) надежно показал монотонное снижение частоты сейсмических флуктуаций за несколько часов до сильного землетрясения, а за 2 ч 50 мин — двукратное возрастание активности, стимулирующее образование магистрального разрыва. За форшоки приняты



Аномальное изменение квадрата коэффициента корреляции между двумя мультифрактальными параметрами микросейсмических колебаний перед землетрясениями в Японии; вертикальные линии — даты землетрясений: 25.09.2003 и 11.03.2011; горизонтальные стрелки — периоды ожидания от острого минимума графика до сейсмических катастроф [Lyubushin, 2018]. Стрелка 1 указывает на сильное землетрясение-форшок. Стрелки 2, 3 построены в апреле 2010 г., стрелка 3 указывает середину 2010 г. — нижнюю оценку момента времени катастрофы

землетрясения с $5 \leq M < 7,5$ не дальше 600 км от эпицентра главного толчка, произошедшие не ранее 10 ч до него. В основе прогноза лежит кумулятивный эффект волн от форшоков, пробегающих всю Землю и возвращающихся к месту главного толчка, что стимулирует его. Толчок в свою очередь возбуждает объемные и поверхностные упругие волны от эпицентра со скоростью 4 и 3,7 км/с соответственно, которые, также обогнув Землю, через 2,8 и 3 ч после главного толчка возвращаются к эпицентру, давая кумулятивный эффект и стимулируя образование афтершоков. Объемные волны, достигнув эпицентра, усиливаются с резонансным «замыканием на себя»; прогноз при этом чрезвычайно сложен.

По [Ягодин, 2017], на месте эпицентра будущего землетрясения «гравитационно-резонансные явления, обусловленные динамикой взаимосвязи Луна–Земля–Солнце», могут начаться случайно, но при совпадении: а) определенной фазы Луны и определенных угловых соотношениях потенциально сейсмогенного разлома и линии Луна–Земля–Солнце; б) устойчивого, до нескольких дней, резонанса в большом диапазоне низких частот; в) прерывистого прохождения лунной приливной волны с признаками начала резонанса и аккумуля-

ции энергии в зоне будущего эпицентра с выходом на противоположную сторону Земли. Возникает канал возврата энергии к исходной точке с зарождением объемной волны, а также поверхностной — открытой этим автором «гравитационно-сейсмической стоячей волны Козырева–Ягодина» (КЯ-волны) с диапазоном частоты от инфранизкой до звуковой, движущейся к эпицентру будущего землетрясения. При смыкании ее кольцевого фронта происходит взрывное выделение энергии. «Неодинаковое с разных сторон», оно вызывает сейсмогенное смещение блоков по разрыву. Эта же волна — вероятная причина появления облаков-предвестников, существующих 5–10 мин, порожденных инфразвуковыми колебаниями. Станции (с интервалом 200–500 км) фиксируют «резонансные пики зарождения землетрясения», облачные гряды и КЯ-волну — предвестник мощного толчка.

Выявлена линейная зависимость промежутка времени между регистрацией резонансного пика и началом сильного землетрясения от расстояния между датчиком и эпицентром. Толчок происходит не в пунктах фиксации проходящей волны, как обычно ожидают, а на продолжении траектории ее движения, медленного настолько (≈ 100 км/ч),

что, как полагает А.П. Ягодин, толчок прогнозируем: по времени — с достаточным упреждением, а по месту — на пересечении направлений от нескольких станций перпендикулярно фронту волны и облачным грядам. Прогноз же магнитуды по величине облаков ненадежен — они возникают уже перед событиями с $M_{3,5} \div 4$.

Заметим, что в рамках этой методики зафиксировать некий единичный сигнал — предвестник (резонансный пик, «всплеск», волну) некоторой интенсивности, установить направление и скорость его движения, сопоставив с ним последующий единичный толчок некоторой магнитуды, было бы несложно. Однако в исследованиях А.П. Ягодина фигурируют события с магнитудой от 4 до 7 и более (разница в энергии более 4-х порядков), которым могут предшествовать, и не единично, аномалии — предвестники разной интенсивности. При этом во фрактальной структуре геосреды ни землетрясения, ни предвестники не группируются в какие-либо отчетливые градации по размерам и интенсивности. В этих условиях взаимная корреляция толчков и предшествующих сигналов на основе неких выводов по первым замерам, например, о якобы всюду и всегда неизменно низкой скорости перемещений, не может считаться заведомо корректной. Возможна произвольная подгонка поступающих данных, а также предвзятая формальная компоновка пар предвестник—толчок под ранее постулированную постоянную скорость. Без дополнительных критериев *парагенетического* взаимосоответствия тех или иных аномалий и землетрясений можно получить правдоподобные, но ошибочные по существу, «фантомные» прогнозы.

Сомнений добавляет некое выбраковывание незначительных, по А.П. Ягодину, землетрясений, критерии сопоставления которых с предшествующими «значительными» или «незначительными» аномалиями не ясны. Тем не менее сообщается, что надежная корреляция упомянутых параметров неоднократно подтверждена; аномалии — предвестники землетрясений с M_4 зафиксированы при удаленности от эпицентров до 700 км, с M_5 — до 1500 км, с M_6 — до 5000 км; с M_7 и более — на любых удалениях. Глобальная система наблюдений гарантировала бы, по этому автору, стопроцентно надежный точный прогноз за несколько часов—дней до события. Для разрешения вышеупомянутых сомнений методического характера нужен тщательный анализ первичных наблюдаемых данных. В приведенном кратком обзоре важно оценить правомерность этих сомнений в свете фактически достигнутых результатов.

В 2008–2009 гг. для пространства, включающего Ближний Восток, Италию, Северную Атлантику, Японию, Китай, А.П. Ягодиным выданы и задокументированы 13 прогнозов. Некоторые из них подтвердились, в нескольких случаях, по

А.П. Ягодину, соответствие землетрясений конкретным предвестникам установлено постфактум. В результате изучения нами этого материала выявлено, что указания мест ожидаемых землетрясений соответствует предложенным выше требованиям полностью или приблизительно в 5 прогнозах из 13; времени — в 10, магнитуды — в 12. В итоге по всем трем параметрам соответствуют требованиям точно или приблизительно лишь 4 или 5 прогнозов. Из них лишь 3 или 4 прогнозам реальные события соответствуют по трем параметрам точно или приблизительно. Неясность расположения и границ СПО не позволила сопоставить число прогнозов, пусть только частично оправдавшихся, с числом непредсказанных катастроф.

Тем не менее, по А.П. Ягодину, станции (от 4-х и более), удаленные от потенциального эпицентра на расстояние до 2000 км, позволят определить его место на расстоянии 1000 км с погрешностью не более 20 км за 0,5–2 ч до события. Станции в восточном Средиземноморье и в Малой Азии могли бы, как он считает, охватить прогнозированием Италию, Грецию, Египет, Иорданию, Израиль, Сирию, Ливан, Ирак, Иран, Кавказ.

Важно отметить, что в соответствии с каталогом USGS (URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>) в пределах указанного пространства — в четырехугольнике на карте местности с вершинами в пунктах Милан, Астрахань, Абу-Даби, Триполи, в 2005–2017 гг. произошло около 450 землетрясений с $M \geq 5$. Это дает некоторое представление о том, каким в этом СПО было бы число успешных предсказаний при гарантируемой автором 100%-ной эффективности краткосрочного прогнозирования. Если же из 400–500 происшедших землетрясений относительно успешно предсказаны 15–20 событий, то, даже без учета неясностей методики и границ СПО, очевидно, что эффективность такого прогнозирования далека от ожидаемой, а полноценное (по числу и размещению станций) апробирование изложенной методики еще только предстоит.

По [Дода и др., 2009, 2013], предвестниками землетрясений с $M > 6$ могут быть аномалии электротеллурического поля, гравитационного поля, вращения Земли и сейсмотектонических процессов. Зона подготовки и магнитуда прогнозируются по характерным облачным структурам в сочетании с пересечениями крупных разломов и проекции на геоид «сейсмомангнитного меридиана», определяемого неоднозначно. Геомагнитные возмущения — триггеры землетрясений на 14-е или/и 22-е сутки; наземно-космический мониторинг приводит к прогнозу с двух–трехнедельным упреждением в 7° радиальной ($R \approx 770$ км) эпицентральной зоне диаметром 1400–1500 км.

При *ретроспективном*, по каталогам, апробировании методики «около 700 прогнозов» землетрясений с $M \geq 6$ подтвердились на 80–95% с ошиб-

ками по месту 770 ± 330 км, по времени — ± 2 сут, по магнитуде — $\pm 0,3$. В 2009 г. в Калифорнийском заливе три события с $M_{\max} = 6,9$ спровоцированы через 12 сут аномальной геомагнитной бурей при совпадении по времени с максимальной фазой солнечного затмения в другом полушарии. В двух предсказанных землетрясениях с $M_{6,3}$ и $M_{7,1}$ (Япония, 2010 г.) уменьшение реальных значений магнитуды по сравнению с предсказанными объяснены серийностью событий. Тогда же оправдались прогнозы $M_{6,2}$ и $M_{5,6}$ (Камчатка) и серии событий с $M_{\max} = 5,9$ в Южном полушарии (Южные Сандвичевы о-ва, «сопряженные с Камчатской зоной»). «Сопряженность» приписана и событиям 2011 г. с $M_{5,1}$ (Испания) и $M_{6,8}$ (о-ва Лоялти, Новая Каледония, Тихий океан). Прогноз событий с $M \geq 6$ подтвержден не всегда, в прогнозах же дат событий лишь в одном случае допущена ошибка в сутки. Отметим проблематичность подразумеваемой указанными авторами *парагенетической* (а не формально временной) *сопряженности* событий, пространственно разобщенных настолько, что СПО — фактически вся планета. Сами эти авторы признают, что теоретическое обоснование отдельных сторон принятой схемы прогнозирования и физических механизмов взаимосвязи различных предвестников сейсмических событий на уровне количественных моделей пока не получено. Сбои прогнозирования возможны под действием вулканов, при прохождении тайфунов, при серийности толчков. Несмотря на эти ограничения, полученных результатов, по их мнению, достаточно для того, чтобы проблему принципиальной возможности краткосрочного прогноза землетрясений с $M \geq 6$ считать «фактически решенной».

Этому утверждению явно противоречит самокритичное признание [Дода и др., 2013] того, что из 548 землетрясений с $M \geq 6$, произошедших на планете, по данным Геологической службы США, с начала 2007 г. до февраля 2010 г. удалось приемлемо спрогнозировать лишь 20 событий, т.е. это «капля в море», по выражению самих авторов.

Такое соотношение, даже без учета теоретико-методических сомнений, конечно, не свидетельствует о «*фактическом* решении» проблемы краткосрочного прогноза. Разительный контраст столь скромных результатов нормативного прогнозирования *будущих* землетрясений и 80–95%-ной *ретроспективной* «успешности» вышеупомянутых 700 прогнозов *произошедших событий* не позволяет считать подобные оценки эффективности ни взаимосопоствимыми, ни эквивалентно адекватными по отношению к реальности. Тринадцать у А.П. Ягодина или двадцать у Л.Н. Дода успешных, по их мнению, прогнозов — единичные случаи локальных частичных совпадений с реальностью, лишь подчеркивающие *фактическую* очевидность глобальной нереализуемости качественного краткосрочного сейсмопрогнозирования.

Завершим обзор краткими предварительными заключениями о состоянии анализируемой проблемы в ее трех основных аспектах: в **теоретическом** — отдельные события в динамическом хаосе (нелинейном сейсмическом процессе) *принципиально непрогнозируемы* (подробнее об этом см. ниже); в **методическом** — отчетливые градации (по размерам, амплитуде, интенсивности, скорости) волн, разломов, блоков, очагов землетрясений во фрактальной структуре геосреды *невывделяемы*, а соотношения событий с той или иной магнитудой с аномалиями — предвестниками определенных градаций *неизбежно проблематичны*; в **фактуальном** — в общем потоке происходящих сильных землетрясений доля корректно краткосрочно прогнозируемых событий *всегда и везде незначительна*.

Результаты исследований и их обсуждение.

Научная литература по проблеме краткосрочного прогнозирования землетрясений необозрима, причем диапазон мнений — от категорического «невозможно» до безоговорочного «на 100% достигнуто», а диапазон аргументов — от ссылок на фундаментальные законы физики до предъявления конкретных очевидных фактов. Сейчас уже ясно, что ответ на вопрос о реализуемости качественного краткосрочного прогноза сильных землетрясений невозможен без четко сформулированных, обоснованных и унифицированных требований к прогнозу с учетом его специфики. Нескончаемая череда неудач показала, что предельная лаконичность традиционной формулы прогноза «*место, энергия, время*» без конкретной и точной расшифровки дезориентирует исследователей, порождая произвольные, упрощенные или неоправданно широкие трактовки и допуски, например, по времени выдачи прогнозов: для краткосрочного — за 1 год, для оперативного — за 1 месяц до события [Бобровский, 2016]. Выше была предложена для обсуждения система нормативных характеристик и ограничений, которая могла бы, по нашему мнению, способствовать адекватной оценке результатов прогнозирования. При этом следует исходить из того, что высокая (80% и более) подтвержденность прогнозов практически ценна, только если она охватывает не менее 85–90% происшедших землетрясений. Определять соответствующие процентные соотношения необходимо в рамках общего числа реальных событий (а не заявленных прогнозов) за время исследований в заданных пределах магнитуды и границах СПО. Даже 100%-ная оправдываемость прогнозов совсем не означает 100%-ной эффективности прогнозирования: подготовка огромного большинства даже сильнейших землетрясений проходит незаметно, а процент пропущенных катастроф недопустимо высок.

Ранее уже упоминалось множество конкретных неоспоримых фактов — наиболее мощные, разрушительные и тем не менее непредсказанные

землетрясения. Им противопоставляют немногочисленные прогнозы, как правило, формулируемые неполно и/или недостаточно определенно, например, по месту — круговые зоны с диаметром до 1500 км, по времени — периоды ожидания событий, начиная от некоторых дат, и т.п. «Успешность» подобных прогнозов, обнародуемых обычно постфактум, широко афишируется, а неподтвержденные прогнозы и факты пропуска землетрясений в большинстве выпадают или, точнее, выводятся из рассмотрения.

Неудачи оправдывают чаще всего недостаточным количеством станций наблюдения. Но это всего лишь попытка скрыть некорректность прогнозирования: либо преждевременное применение недостаточно апробированного метода, оценить эффективность которого еще только предстоит, либо замалчивание выявленных ограничений применимости метода.

Еще одно популярное «оправдание» — недоизученность «во всех деталях» механизма подготовки и реализации землетрясений. Какие это детали и почему ожидается, что их знание позволит, наконец, успешно решить проблему прогнозирования, — не разъясняется. Цитированные выше В.С. Бобровский [2016], И.Л. Гуфельд с соавторами [2011], А.А. Любушин и М.В. Родкин [2008] прямо указывают на то, что оправдываемость задокументированных краткосрочных прогнозов зафиксирована только в единичных случаях, почти всегда лишь отчасти удовлетворяющих требованиям к точности соответствия ожидаемому реальному событию.

Подчеркнем, что надежность применявшихся методов прогнозирования ни в одном случае не подтверждена надлежащим апробированием. Нередкие, особенно в интернете, заявления о достижении 100%-ной достоверности прогнозирования — не более чем результат осознанной (или нет) подмены понятий: вместо процентного соотношения успешных прогнозов и всех реально происшедших землетрясений в границах определенного СПО предъявляют соотношение оправдавшихся и всех заявленных прогнозов при общей, как правило, небольшой (несколько десятков) их численности. Следуя такой «логике», можно было бы возвестить о полном, 100%-ном успехе прогнозирования даже в высокосейсмичной зоне при подтверждении, например, трех прогнозов — из всего лишь трех имеющихся. В то же время границы исследованных площадей, если и указываются, то настолько неопределенно, что затруднительно сопоставить число подтвержденных (хотя бы отчасти) прогнозов с числом реально происшедших там и за то же время, но непредсказанных сильных землетрясений.

Заключение. Несмотря на многолетние усилия, направленные на повышение детальности и полноты изучения, сколько-нибудь заметно увеличить эффективность краткосрочного прогнозирования

не удалось. Сильнейшие сейсмोकатастрофы по-прежнему оказываются неожиданными даже в районах, где детальные наблюдения проводятся давно и непрерывно. При множестве методических инноваций, подчас весьма изощренных математически, стратегия краткосрочного прогнозирования остается неизменно простой: поиски некоего нового, еще более надежного предвестника (набора предвестников). И хотя предвестники, разумеется, существуют (их не может не быть), все оканчивается очередной неудачей. Ни эфемернейшие «облачные индикаторы», ни предкатастрофические активизации, затишья, консолидации блоков, изменения в спектрах флуктуаций форшоковой активности, ни по отдельности, ни в сочетаниях, не спасают положение. Давно известно, что за той или иной, даже отчетливо выраженной аномалией, трактуемой как предвестник, не обязательно следует землетрясение некоторой определенной магнитуды; не всякое, даже сильное землетрясение предваряется некой аномалией, своевременно распознаваемой и адекватно интерпретируемой как предвестник (хотя, как замечает А.А. Любушин, какой-нибудь предвестник постфактум непременно обнаруживают).

Сейчас уже вполне очевидно, что наличие предвестника, конечно, необходимо, но одного этого недостаточно для надежного предсказания сейсмического события. Ибо (что, по существу, никто и не отрицает) фундаментальные факторы подготовки и вместе с тем трудной предсказуемости реализации катастроф, неотъемлемо присущие процессу сейсмогенного разрывообразования, продолжают действовать. Это грубодискретная фрактальность геосреды и вытекающие из этого неэффективность осреднений; отсутствие каких-либо выделенных размеров (рангов) разломов, блоков, их агрегаций, очагов, эпицентральных зон; неотчетливость различий фоновых и аномальных структур и состояний; невозможность строгой калибровки аномалий — предвестников и однозначного соотнесения их с ожидаемыми землетрясениями определенной магнитуды. Это также нелинейность, бифуркационность локализации и ориентировки скалываний при последовательных разрушениях тех или иных из множества разноранговых блоков, нерегулярность (динамический хаос) в поведении геосистем с чувствительной зависимостью от малейших неточностей оценки начальных условий, параметров и текущей обстановки (граничных условий) [Наймарк, 2003]. Результат: теоретически предписанная и эмпирически фиксируемая принципиальная невозможность надежного и точного прогноза места, энергии и времени отдельных событий при любой практически достижимой детальности и максимально возможной полноте изучения, что, разумеется, не исключает единичных частичных или даже полных случайных совпадений прогноза с реальностью. Со временем

такие совпадения накапливаются в принципе до бесконечности. Но число непредсказанных событий увеличивается во много раз быстрее.

Мы подтверждаем нашу убежденность [Короновский, Наймарк, 2012, 2013] в том, что можно предвидеть детерминированно-хаотический характер нелинейного сейсмического процесса в целом, а также отдельные его стадии, сценарии перехода от одной стадии к другой, тип аттрактора. Но требуемые надежность и точность краткосрочных прогнозов конкретных событий останутся недостижимы. По [Захаров, 2014], сейсмостектонические системы с самоорганизованной критичностью характеризуются детерминированно-хаотическим поведением и непредсказуемостью конкретной динамики и сейсмокатастроф. Детерминированность в данном контексте понимается как абстрактно мыслимая прогнозируемость событий при «абсолютно точных» оценках параметров, начальных и граничных условий процесса, при малейших отклонениях от которых неизбежны хаотичность и непредсказуемость.

Мы полагаем, что адекватность вышеприведенных констатаций на современном уровне знаний не нуждается в каких-либо дальнейших теоретических и эмпирических подтверждениях, подобно тому, как уже давно не нуждается во всем этом суждение, например, о невозможности создания вечного двигателя. Недоразумением считаем высказывания об «устарелых идеях» принципиальной непредсказуемости отдельных событий в динамическом хаосе [Шуман, 2014]. Эти идеи устарели не больше, чем фундаментальные физические законы сохранения, еще полтора века назад прервавшие пятивековую погоню за ускользающим фантомом *perpetuum mobile*. Тезис [там же] о возможности иногда и отчасти реализуемых прогнозов следует отвергнуть. В сугубо прагматичном краткосрочном применении никаких «иногда» и «отчасти» быть не должно: практически примени-

мый, т.е. достаточно точный, надежный и полный прогноз или есть, или его нет.

Учитывая сказанное, не следует ли прекратить столь малорезультативные и, очевидно, бесперспективные попытки краткосрочного прогнозирования, как это сделали на Западе в конце XX в., а в отношении проектирования вечных двигателей — еще в 1775 г.? Полагаем, что нет, поскольку в ходе такой работы все же нередко обнаруживается что-то новое и полезное, а полученный и обоснованный, хотя и негативный результат, закрывая одни возможности, неожиданно открывает другие. Вечных двигателей нет, однако, эффективные долговечные двигатели созданы и совершенствуются, причем не без учета знаний и опыта, накопленных в стремлении к «вечному». И сейчас использовать опыт и знания, добытые в упорных, но заведомо тщетных попытках получения фантомных краткосрочных прогнозов, может быть полезно при проектировании вполне реальных долговременных сейсмостойких сооружений. Следует продолжать фундаментальные работы по проблеме сейсмопрогнозирования, возможные позитивные результаты которых трудно или даже невозможно заранее предвидеть, запланировать и оценить. Для прикладных же прогнозных исследований, полагая их 100%-ную эффективность заведомо нереальной, а 50%-ную и менее — безусловно неудовлетворительной, можно было бы принять, что их финансирование вполне оправданно при ожидании не менее 85–90% эффективности, и оправданно лишь весьма относительно — при более 50% успешных предсказаний от общего числа землетрясений с $M \geq 5,5 \pm 0,5$, произошедших за время исследований в границах определенного СПО.

Однако для ожидания хотя бы столь малоустойчивой краткосрочной предсказуемости конкретных событий в динамическом хаосе, каким является нелинейный сейсмический процесс, нет ни теоретически, ни эмпирически достаточных оснований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобровский В.С. Программно-аппаратные средства сети геоэлектрических измерений для изучения локальных и глобальных эффектов, предвещающих сильные землетрясения: Автореф. канд. дисс. М., 2016. 23 с.

Гаврилов В.А., Власов Ю.А., Денисенко В.П. и др. Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2006. Вып. 8. № 2. С. 43–53.

Гульельми А.В., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Лавров И.П. О форшоках сильных землетрясений // Физика Земли. 2014. № 4. С. 43–49.

Гуфельд И.Л., Матвеева М.Л., Новоселов О.Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений? // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 4. С. 378–415. doi: 10/5800/GT-2011-2-4-0051.

Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Степанов И.В. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений // Докл. РАН. 2013. Т. 453, № 5. С. 551–557.

Дода Л.Н., Новикова Н.Н., Пахомов Л.А., Степанов И.В. Космический мониторинг предвестников землетрясений // Наука в России. 2009. № 6. С. 30–37.

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., Наймарк А.А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 6. С. 3–12.

Короновский Н.В., Наймарк А.А. Землетрясения: возможен ли прогноз? // Наука и жизнь. 2013. № 3. С. 37–43.

Кочкин Б.Т., Петров В.А. Долгосрочный прогноз сейсмической опасности в связи с проблемой изоляции радиоактивных отходов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 7. С. 1369–1380.

Любушин А.А. Прогностические свойства случайных флуктуаций геофизических характеристик // Междисци-

плинарный научный и прикладной журн. «Биосфера». 2014. Т. 6, № 4. С. 319–338.

Наймарк А.А. Сценарий возникновения тектонодинамического детерминистского хаоса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2003. № 5. С. 22–31.

Родкин М.В. Прогноз непредсказуемых катастроф // Вокруг света. 2008. № 6. С. 89–97.

Шуман В.Н. Нелинейная геодинамика геосреды: переходные процессы и критические явления // Геофизический журн. 2014. Т. 36, № 6. С. 129–142.

Ягодин А.П. Международный центр предупреждения (предсказания) землетрясений. 2017. URL: <https://sites.google.com/site/earthquakepredict/r1> (дата обращения: 17.03.2018).

Bak P., Tang C. Earthquake as a self-organized critical phenomenon // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94. P. 15635–15637.

Geller B., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. Earthquakes cannot be predicted // Science. 1997. Vol. 275. P. 1616–1617.

Huang J., Turcotte D.L. Are earthquakes an example of deterministic chaos? // J. Geophys. Res. 1990. Vol. 17. P. 223–226.

Lyubushin A. Prognostic properties of seismic noise at Japan Islands / Institute of Physics of the Earth. Moscow. Ver. 5 October 2018. URL: http://alexeylyubushin.narod.ru/Prognostic_properties_seismic_noise_Japan.pdf (дата обращения: 05.11.2018).

USGS Earthquake Hazards Program. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/> (дата обращения: 05.11.2018).

Поступила в редакцию 06.12.2018

Поступила с доработки 11.12.2018

Принята к публикации 11.12.2018