

О научных основах краткосрочного прогноза землетрясений

© **В. Н. Страхов**¹, **М. Г. Савин**², 2013

Институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта, Москва, Россия
Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия
Поступила 17 декабря 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Викладено критичний огляд існуючих методів короткострокового прогнозу землетрусів і деякі результати математичного моделювання процесів тріщиноутворення в літосфері. Сформульовано загальну наукову методологію короткострокового прогнозу, що включає п'ять необхідних і дві достатні умови, яка, на думку авторів, істотно підвищує ймовірність прогнозу сейсмічної події. Наголошено на насущній потребі негайного створення площадкової комплексної спостережної мережі для геофізичного моніторингу вогнища підготовлюваного руйнівного землетрусу, а також штучного інтелекту, який в автоматичному режимі здійснюватиме рангове розпізнавання сейсмічної ситуації. Приділено увагу вимогам, що ставляться до обчислювальної техніки для оснащення спостережної мережі (кластери з потужних комп'ютерів). Зроблено висновок щодо необхідності створення спеціальної Федеральної програми, у межах якої слід побудувати систему короткострокового прогнозування землетрусів.

Critical review of existing methods of short-term earthquake prediction and some results of mathematical modeling of the processes of fracturing in lithosphere is developed. General scientific methodology of short-term prediction is formulated including five necessary and two sufficient conditions increasing probability of the forecast of seismic event according to the authors' opinion. Vital necessity is underlined of immediate creation of areal complex observation net for geophysical monitoring of the focus of imminent destructive earthquake as well as artificial intellect to implement rank recognition of seismic situation in automatic regime. Attention is paid to making demands to computing instruments for equipping observation net (clusters of powerful computers). Conclusion is made on the necessity of creation of special federal Program, with a task of producing the system of short-term prediction of the earthquakes.

Введение. Как упоминалось ранее [Страхов, Савин, 2013], проблема прогноза землетрясений была поставлена сейсмологией более 100 лет назад. Однако с тех пор, несмотря на огромный объем выполненных исследований [Аки, Ричардс, 1983; Болт, 1984; Гир, Шах, 1988; Войтов, Попов, 1989; Соболев, 1993], успехи в области долгосрочного и среднесрочного прогноза достаточно скромны [Соболев, 1989; Соломатина, 1990], а в вопросах наиболее социально значимого краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений ученых преследуют хронические неудачи [Друмя, 1985; Рейснер, 1989; Кейлис-Борок, 1992]. Известно, что наибольшие затруднения возникают с предсказанием времени наступления сейсмического события. Стал уже хрестоматийным едва ли не единственный в истории сейсмологии пример полного крат-

косрочного прогноза землетрясения $M=7,3$ в г. Хайчен (Китай) 4 февраля 1975 г. [Wang, Chen, 2006]. Однако последовавшее 28 июля 1978 г. Тангшаньское землетрясение, в котором погибло несколько сотен тысяч человек, спрогнозировано не было. На некоторое время это поставило под сомнение дальнейшие исследования по прогнозу землетрясений.

О причинах неудач принципиального характера, связанных с неприменимостью детерминистского подхода и, следовательно, линейных уравнений для описания процессов в период подготовки землетрясений, упоминалось в нашей предыдущей статье [Страхов, Савин, 2013]. На самом деле, множество механизмов, действующих в литосфере и создающих неустойчивость (миграция флюидов, способная резко снизить прочность разлома, химическое разупрочнение пород, фазовые

переходы с потерей объема и другие), превращают литосферу в энергонасыщенную, хаотическую и нелинейную систему, в которой прошлое не определяет будущего. Отсюда и трудность краткосрочного прогноза [Соломатина, 1990]. К этому следует добавить мерцающий/мозаичный характер предвестников землетрясений, т. е. их неустойчивость [Савин, 2005].

Исследователи находят все новые и новые разновидности геофизических предвестников [Савин, Рокитянский, 2011; Гульельми, Зотов, 2012], но вопрос о механизмах связи их с землетрясениями, тем не менее, остается нерешенным. В этом смысле можно лишь с большой осторожностью уверенно говорить об обнаруженных предвестниках как аномалиях природных явлений, регулярно предшествующих сейсмическому событию. Более уместно говорить о возможных предвестниках. В реальности «чаще всего наблюдаются противоречия: иногда изменения наблюдаются, но землетрясение за ними не следует; в других случаях землетрясение происходит, хотя никаких изменений замечено не было» [Гир, Шах, 1988].

Нельзя не упомянуть и о попытках математического моделирования процесса образования и эволюции в литосфере геологических разрывов — трещин [Соболев, 1993]. Наиболее известные результаты в этой области: модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ), предложенная учеными ИФЗ РАН, дилатантно-диффузионная (ДД) модель, созданная их американскими коллегами, и модель «крип» [Соболев, 1989]. Однако вопрос о природе краткосрочных предвестников в рамках указанных моделей остается открытым, как не увенчались успехом и попытки зарегистрировать таковые перед большинством землетрясений. Оказалось, что при детальном рассмотрении обозначенных выше и других моделей (консолидации, неустойчивого скольжения, фазовых превращений) их преимущества перекрываются недостатками.

Сейсмологам хорошо известны глубоко пессимистические выводы, сделанные на совещании «Оценка проектов по прогнозу землетрясений» 1996 г. в Лондоне. В частности, участники совещания констатировали, что «казавшаяся очевидной парадигма, согласно которой сейсмическому событию, реализующему огромную энергию, должны предшествовать идентифицируемые и наблюдаемые предвестники, оказалась неверна. Зем-

летрясениям присуща непредсказуемость» (R. J. Geller); «не существует физической основы прогноза индивидуального землетрясения» (I. G. Main); «статистический подход предпочтительнее исследования физических процессов» (P. C. Leary). По нашему мнению, последний вывод в свете предлагаемой ниже методологической концепции заслуживает особого внимания. Однако если внимательно вчитаться в протоколы указанного совещания, то можно прийти к убеждению, что, несмотря на категоричный тон дискуссий, все приводимые выводы сводились к констатации сложности и слабой изученности проблемы. И с этим нельзя не согласиться.

Комплексирование предвестников. Формулировка прогноза. У читателя может сложиться впечатление, что в проблеме краткосрочного прогноза нет возможности вырваться из заколдованного круга: куда не кинь, всюду клин. В самом деле, уместно задаться вопросом: исчерпаны ли возможности традиционного подхода в проблеме краткосрочного прогноза, связанного с анализом наблюдаемых предвестников землетрясений? Какие шаги следует предпринять, чтобы добиться успеха в решении проблемы?

Еще раз напомним, что процесс подготовки землетрясений порождает множество предвестников различной природы и все они связаны между собой бесчисленными внутренними зависимостями, ускользающими от внимания сейсмологов [Савин, 2005]. Авторы методов краткосрочного прогноза, обычно узкие специалисты, к несчастью, игнорируют это принципиальной важности обстоятельство. Как правило, каждый из них абсолютизирует значимость отдельно взятого предвестника, что в корне ошибочно и недопустимо для прогнозирования сейсмического события [Страхов, 1989; Савин, 2010]. Такова природа вещей. Действительно, выше обращалось внимание на неустойчивость поведения предвестников по отношению к факту реального землетрясения. Поэтому со временем, казалось бы, достоверные предвестники превращаются в некие «мерцающие признаки» (термин, начинающий приживаться в сейсмологии). Эти признаки, словно призраки, как блуждающие огни в пустыне, зовут и манят путешественника в мире прогноза землетрясений — мире, который — увы! — до сих пор остается виртуальным.

Обратимся к формулировке прогноза, данной одним из авторов настоящей статьи как

ключевой при построении общей научной методологии: «Прогноз землетрясений — это построение устойчивого целого из множества неустойчивых компонент» [Страхов, 1989]. Здесь «неустойчивые компоненты» — предвестники землетрясений, или аномалии комплекса геофизических, геохимических, биологических, метеорологических и других природных процессов, предшествующих землетрясению. Характерно, что при подобном статистическом подходе, в основе которого лежит идея комплексов максимально возможного числа предвестников, мы сознательно уклоняемся от обсуждения сложнейших и пока непостижимых наукой процессов подготовки землетрясений. В то же время вопросы математического и физического моделирования этих процессов, далеко не всегда адекватные реальной ситуации в очаге землетрясения, также остаются в стороне и не затрагивают предлагаемые методические принципы.

Уместно привести высказывание одного из ведущих отечественных сейсмологов А. В. Николаева [Николаев, 2003], которое подтверждает и дополняет изложенные нами аргументы (с учетом соображений, упомянутых в предыдущей статье [Страхов, Савин, 2013]) и в определенном смысле предвосхищает некоторые положения научного методологического подхода, сформулированного ниже. «Эти перечисленные свойства (свойства глубинных геофизических процессов, предшествующих землетрясению: эмерджентность, дивергенция эволюции, смена режимов самоорганизации и хаотизации, возникновение катастроф — В. Н. Страхов, М. Г. Савин), пишет А. В. Николаев, позволяют сделать общие выводы по приоритетам ориентации фундаментальных, поисковых геофизических исследований. Это — ведущая роль эксперимента по отношению к теории (что совсем не отвергает огромной роли последней), главенствующая роль дедуктивного принципа от общего к частному по отношению к индукционному (что не отвергает важности индукционного подхода); необходимость одновременного наблюдения полей различной геофизической природы, проявляющихся в различных оболочках Земли, и воздействующих на них естественных и техногенных процессов; необходимость глобализации систем наблюдений на основе соображения, что если прямые воздействия могут охватывать крупные регионы, то сложные, опосредованные взаимодействия имеют

глобальный характер; необходимость исследования тонкой пространственно-временной структуры исследуемых процессов, что определяет необходимость создания плотных пространственных систем наблюдений, расширения частотного диапазона; смягчение физических ограничений по отношению к гипотезам, основанным на геологических свидетельствах: идея не должна быть отвергнутой только потому, что она не находит физического объяснения (не находит сегодня — найдет завтра); презумпция возможности возникновения необычных явлений, «чудес», презумпция научного оптимизма».

Структура общей научной методологии краткосрочного прогноза. По мнению авторов, одна из возможных причин неудачных попыток краткосрочного прогноза кроется в отсутствии научно обоснованной общей методологии. Принципы научного подхода [Страхов, 2004; Савин, 2005; Страхов, Савин, 2013] диктуют нам, что в решении любой проблемы следует исключить условия, необходимые для решения проблемы, и те, которые при выполнении необходимых условий являются достаточными. Естественно, что в геофизике эти условия не следует понимать в буквальном, чисто математическом смысле. Кроме того, авторы считают необходимым подчеркнуть, что не все из выдвигаемых ниже положений, включающих необходимые и достаточные условия для решения проблемы краткосрочного прогноза землетрясений, оригинальны. Например, хорошо известны многолетние обсуждения сейсмологами насущной необходимости комплексов предвестников землетрясений, а воз и ныне там. То же можно сказать и о создании плотной сети наблюдений различных геофизических полей, способах обработки данных полевых наблюдений, включающих применение мощной вычислительной техники, и некоторых других, не менее важных положениях. Наша цель — попытка построения непротиворечивой и последовательной общей методологии, иначе говоря, программы действий, ключевая идея которой состоит в комплексном геофизическом мониторинге земной коры и создании искусственного интеллекта для распознавания вероятности сейсмического события. Пошаговое выполнение этой программы поможет консолидировать совместные усилия геофизиков и значительно повысить шансы на достоверный краткосрочный прогноз разрушительных землетрясений.

А. Для решения проблемы краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений необходимо выполнение следующих условий.

1. Необходимо знать (приблизительно, но с определенной точностью) расположение очага готовящегося землетрясения.

2. Необходимо заранее создать комплексную наблюдательную сеть, обеспечивающую слежение за состоянием очага готовящегося землетрясения. Данная сеть должна обеспечивать площадной мониторинг в реальном времени 10—15 геофизических параметров, включая слежение в окрестности очага готовящегося землетрясения: а) за сейсмическим режимом; б) гидрогеологическими и геохимическими процессами (измерения в скважинах); в) деформационными процессами; г) пространственно-временным распределением геофизических полей (магнитного, электромагнитного, гравитационного и др.).

3. Получаемая с наблюдательной сети комплексная информация должна передаваться в два обрабатывающих центра: а) административный и научный центр самой сети; б) центр Геофизической службы РАН.

4. Обрабатывающие центры должны иметь достаточно мощную вычислительную технику (например, мощные кластеры из персональных компьютеров, не менее 32 компьютеров в кластере): обработка и интерпретация всей комплексной информации, поступающей с наблюдательной сети, должна осуществляться в реальном времени с задержкой не более 2 часов.

5. В каждом обрабатывающем центре должен быть обширный банк данных наблюдений по измерениям во времени параметров, регистрируемых наблюдательной сетью, за достаточно длительное время; этот банк должен содержать данные и о прошедших ранее (в очаге, контролируемом наблюдательной сетью) разрушительных землетрясениях.

Б. Необходимы два достаточных условия для обеспечения краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений. Приведем два таких условия, которые в комплексе с перечисленными в п. А необходимыми условиями могут существенно повысить вероятность регулярного краткосрочного прогноза мощных (по энергии) землетрясений.

1. Должна быть создана методика рангового распознавания ситуации, имеющей место в любой момент времени в окрестности контролируемого очага разрушительного землетрясения.

2. Должен быть создан искусственный интеллект для автоматического (без участия человека) рангового распознавания ситуации.

Методика рангового распознавания сейсмической ситуации состоит в том, что один или два раза в сутки выставляется качественная характеристика сейсмической опасности. Выделим пять таких характеристик:

а) спокойная (безопасная);

б) слабозмущенная (вероятность возникновения сильного землетрясения в течение 1—2 сут мала, менее 0,1);

в) возмущенная (вероятность возникновения сильного землетрясения в течение 1—2 сут может достигать 0,3);

г) сильно возмущенная (вероятность возникновения сильного землетрясения в течение 1—2 сут составляет 0,6);

д) катастрофическая (вероятность возникновения сильного в течение 1—2 сут составляет 0,8 и выше).

Номер ситуации (ее ранг) на ближайшие 1—2 сут должен распознаваться искусственным интеллектом и выдаваться в форме табло на экране компьютера.

Первая основная проблема состоит в том, каким образом находится ранг ситуации? Мы полагаем, что методика нахождения ранга ситуации должна выполняться по двухуровневой системе методом распознавания образов. При этом на первом должен определяться ранг ситуации по каждому параметру отдельно, на втором — по совокупности параметров.

Ранги по отдельным параметрам определяются методом сравнения данных по эталонному параметру (за последние 5—7 сут на каждом из пунктов наблюдений) с эталонными данными. При этом последние должны формироваться по данным наблюдений в прошлом (желательно — относящихся к тому самому очагу, мониторинг которого осуществляется в определенное время).

Вторая основная проблема состоит в формировании суммарного ранга, или номера ситуации в целом, после того как ранги по отдельным параметрам найдены. Суммарный ранг $Rg\sum$ вычисляется как сумма рангов по отдельным параметрам rg_k , $1 \leq k \leq n$:

$$Rg\sum = \left\{ \sum_{k=1}^n p_k rg_k \right\}, \quad \sum_{k=1}^n p_k = 1,$$

где p_k — весовые коэффициенты. Основная трудность состоит в определении весовых коэффициентов на основании «обучения» искусственного интеллекта по данным прошлых лет.

Выделим три аспекта, с очевидностью вытекающих из изложенного выше.

Первый — анализ большого количества данных прошлых лет. Очевидно, подобный анализ возможен только в случае, если имеются банки данных (по различным очагам разрушительных землетрясений) наблюдений прошлых лет.

Второй — формирование автоматического анализа данных прошлых лет или, иначе, специализированного искусственного интеллекта, способного анализировать получаемые данные на основе «обучения» на предшествующих данных.

Третий — возможность «переучивания» искусственного интеллекта на тех новых сейсмических событиях, которые происходят в данном очаге с течением времени. Другими словами, с течением времени искусственный интеллект должен все более учитывать специфику контролируемого очага землетрясений. Авторы надеются, что таким образом удастся преодолеть одно из главных затруднений, возникающих при попытках краткосрочного прогноза, а именно учесть неповторимую индивидуальность каждого очага готовящегося землетрясения (координаты, глубина, вероятный фокальный механизм, тип подвижки, магнитуда, степень зрелости и другие параметры), а также тот факт, что один и тот же предвестник для различных очагов наполняется различным содержанием [Савин, 2010], и тем самым уменьшить меру скептицизма в отношении самого прогноза.

Подчеркнем еще одну исключительно важную сторону дела. Речь идет о техническом оснащении тех наблюдательных сетей, которые контролируют состояние наблюдательных сетей, осуществляющих геофизический мониторинг в данном очаге в реальном времени. Оборудование наблюдательных сетей должно быть единообразным, цифровым, должно обеспечивать возможность оперативной передачи данных в центр наблюдательной сети; кроме того, быть автономным, т. е. не требующим частого контроля человеком во времени. Естественно, что и вычислительная техника (кластеры из мощных компьютеров), на которой будут обрабатываться данные, должна быть единообразной.

Решение проблемы краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений описанным выше способом потребует больших финансовых вложений — от 10 до 15 млрд руб. Ввиду большой сложности проблемы срок реализации соответствующего проекта 10—15 лет.

Заключение. Цель предлагаемого авторами способа площадного мониторинга очагов готовящихся разрушительных землетрясений — построение научной основы для создания Федеральной программы по краткосрочному прогнозу землетрясений, необходимость в которой давно назрела. Весьма актуально незамедлительное создание, обсуждение и принятие на всех уровнях подобной программы, поскольку по оценкам сейсмологов в ближайшее время в России ожидается усиление сейсмической активности, что чревато экологическими катастрофами и потребует принятия специальных мероприятий по спасению населения.

Авторы убеждены в принципиальной возможности решения проблемы краткосрочного прогноза катастрофических землетрясений путем создания соответствующей прогностической системы, объединяющей сети инструментальных наблюдений и Центр сбора и обработки данных. Одним из косвенных подтверждений работоспособности предложенного метода может служить успешный краткосрочный прогноз упомянутого разрушительного землетрясения в г. Хайчен (1975), который стал возможен именно благодаря комплексному подходу — измерению и оперативной обработке данных сейсмологической службой Китая по максимально возможному количеству предвестников самой различной природы, в том числе по форшоковой активности.

Изложенные научные положения естественно рассматривать как развитие на современном научно-техническом уровне традиционного подхода к проблеме уменьшения сейсмической опасности, а именно в русле краткосрочного прогноза землетрясений. В совокупности эти положения образуют метод краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений, удовлетворяющий международным стандартам, в том числе требованиям Сейсмологического общества США: он должен обеспечить ожидаемую магнитуду с определенным допустимым отклонением, хорошо определенную зону эпицентра, диапазон времени, когда произойдет сейсмическое событие (от недели до нескольких часов), и вероятность того, что оно действительно произойдет.

Шансы на успешное решение проблемы в общей постановке неизбежно возрастут, если дополнительно к данному способу и параллельно с ним рассматривать вопросы разгруз-

ки тектонических напряжений путем инициации искусственными источниками слабой сейсмичности в области предполагаемого оча-

га готовящегося разрушительного землетрясения. Эти вопросы станут предметом нашей следующей заключительной статьи.

Список литературы

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы. — Москва: Мир, 1983. — Т. 1. — 520 с. — Т. 2. — 360 с.
- Болт Б. В глубинах Земли. — Москва: Мир, 1984. — 189 с.
- Войтов Г. И., Попов Е. А. Геохимический прогноз землетрясений // Природа. — 1989. — № 12. — С. 60—64.
- Гир Дж., Шах Х. Зыбкая твердь. — Москва: Мир, 1988. — 221 с.
- Гульельми А. В., Зотов О. Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // Физика Земли. — 2012. — № 1. — С. 1—4.
- Друмя А. Землетрясения: где, когда, почему? — Кинешев: Штиинца, 1985. — 195 с.
- Кейлис-Борок В. И. Повторный сильный толчок землетрясений: прогноз возможен // Наука в России. — 1992. — № 1. — С. 60—63.
- Николаев А. В. Черты геофизики XXI века. — Москва: Наука, 2003. — С. 7—12.
- Рейснер Г. И. Почему ошиблась карта // Природа. — 1989. — № 12. — С. 12—19.
- Савин М. Г. Лечу землетрясения. Услуги платные // Химия и жизнь. — 2005. — № 11. — С. 8—13.
- Савин М. Г. Несостоявшиеся землетрясения // Химия и жизнь. — 2010. — № 12. — С. 18—21.
- Савин М. Г., Рокитянский И. И. Способ мониторинга очагов землетрясений // Геофиз. журн. — 2011. — 33, № 3. — С. 129—143.
- Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. — Москва: Наука, 1993. — 313 с.
- Соболев Г. А. Проблема прогноза землетрясений // Природа. — 1989. — № 12. — С. 47—55.
- Соломатина Э. К. Предвидеть земную бурю // Наука в СССР. — 1990. — № 1. — С. 5—13.
- Страхов В. Н. Как геофизики должны осуществлять краткосрочный прогноз // Геофизика. — 2004. — № 6. — С. 3—13.
- Страхов В. Н. К новой парадигме сейсмологии // Природа. — 1989. — № 12. — С. 4—9.
- Страхов В. Н., Савин М. Г. Уменьшение сейсмической опасности: упущенные возможности // Геофиз. журн. — 2013. — 35, № 1. — С. 4—11.
- Wang K., Chen Fu. Predicting the 1975 Hakheng Earthquake // Bull. Seismol. Soc. Amer. — 2006. — № 96. — P. 757—795.