

УДК 550.340

О ПРОБЛЕМЕ ПРОГНОЗА ТЕКТОНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2010 г. И.П. Добровольский

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

К настоящему моменту создан и успешно опробован на материале полевых наблюдений ряд методов прогноза тектонического землетрясения, охватывающих вероятностный и детерминированный виды прогноза. Показано существование решения проблемы прогноза, из чего следует возможность и необходимость перехода к его практическому осуществлению. В связи с этим рассматриваются четыре вопроса: краткий обзор проблемы предвестников, включая ее современное состояние (среди опубликованных данных о предвестниках землетрясений имеется немало ложных сведений); современное состояние проблемы прогноза; характеристика района работ; задачи Службы прогноза.

Ключевые слова: землетрясение, предвестник, прогноз.

Введение

Проблема прогноза тектонического землетрясения – одна из частных задач наук о Земле. Более того, она не является самостоятельной проблемой, а представляет собой раздел теории подготовки тектонического землетрясения. В связи с этим ее решение не должно вызывать каких-либо концептуальных трудностей по сравнению с решениями других подобных проблем.

В фундаментальной науке существует правило – проблема (задача) считается решенной, если каким-либо образом показано существование ее решения. В этом смысле проблему прогноза тектонического землетрясения в настоящее время можно считать решенной. Это отнюдь не означает, что с завтрашнего дня мы можем приступить к успешному практическому прогнозу. Это означает другое – мы находимся на этапе, когда проблему прогноза можно и нужно переводить в практическую плоскость. В настоящей работе обсуждаются четыре наиболее важных для данного этапа вопроса.

1. *Проблема предвестников.* Принципиально прогноз тектонического землетрясения основан на том, что сейсмическое событие возникает не внезапно, а существует некоторый период его подготовки, который может быть обнаружен, благодаря существованию предвестников. Следовательно, надо показать, что предвестники реально существуют, объяснив, почему их существование нередко подвергается сомнению.

2. *Проблема прогноза землетрясений.* Работы по прогнозу землетрясений ведутся в разной форме на протяжении более 100 лет. Необходимо подвести итоги этих работ, разобраться в том, что уже сделано и что следует сделать еще.

3. *Выбор необходимых для прогноза характеристик района.* Подготовка землетрясения разворачивается в некотором определенном объеме земной коры. Сегодня мы можем с большой степенью подробности охарактеризовать почти любой район земного шара. Но излишняя подробность в характеристике того или иного района часто затрудняет работу, в то время как недостаток сведений снижает ценность получаемых результатов. В реальности следует попытаться установить, какие же сведения действительно важны для успешного прогноза.

4. *Образование Службы прогноза* – это организационная форма перехода к практической реализации прогноза. Уже сейчас имеет смысл сформулировать основные за-

дачи этой Службы, функционирование которой со временем внесет в них свои коррективы.

Краткий обзор проблемы предвестников и ее современное состояние

В начале прошлого века вышла работа венгерского сейсмолога С. Ковеслигети [Kövesligethy, 1908] о сейсмическом гистерезисе. Ознакомившись с ней, один из основателей российской сейсмологии Б.Б. Голицын сказал, что теперь проблема предсказания землетрясений становится на строго научное основание [Голицын, 1960, с. 71]. Это высказывание знаменательно – из него следует, что проблему прогноза можно рассматривать как реальную научную проблему. Это уже немало, если учесть, что в начале пятидесятых годов прошлого столетия Президиум АН СССР считал задачу прогноза землетрясений фантастической (правда, вскоре это мнение было изменено). Вероятно, наиболее опасным заблуждением было возникшее в то же время устойчивое мнение, что проблема прогноза может считаться независимой в ряду других задач сейсмологии.

Сейчас совершенно очевидно, что в начале XX века проблема прогноза не только не могла быть решена, но не могла быть и поставлена с необходимой аккуратностью. Ее решение опирается на достижения в области механики сплошных деформируемых сред, математики, геофизики и геологии. Нужно было время для развития названных отраслей знаний и, конечно, для формирования группы специалистов, владеющих этими знаниями в необходимом объеме. В тот период наиболее значительной была модель землетрясения Г.Ф. Рейда [Reid, 1910], не утратившая своего значения и до настоящего времени. Теоретическое развитие основных положений модели в рамках указанных отраслей знаний уже тогда могло бы пролить свет на проблему предвестников, но по отмеченным выше объективным причинам этого не произошло. Продолжался естественный процесс накопления эмпирических сведений, обработка которых происходила почти исключительно на базе статистического анализа.

К началу второй половины XX века были накоплены необходимые знания, построен ряд обобщающих закономерностей, созданы высокочувствительные приборы, с помощью которых стали фиксироваться предвестники землетрясений, создана довольно густая сеть сейсмических станций. Все это привело к качественному скачку в сознании сейсмологов, которые стали считать, что проблему прогноза можно решить эмпирически. В результате, в ряде стран появились прогностические полигоны, создатели которых ставили именно эту цель – решить задачу прогноза тектонического землетрясения эмпирическим путем. Серьезная теоретическая база практически отсутствовала, и дело сводилось к “соревнованию” разнообразных качественных моделей подготовки тектонических землетрясений, опирающихся в немалой степени на достижения в области механики разрушения [Добровольский, 1991].

Непрерывная работа в области прогноза приносила все же свои плоды. Появился ряд успешных предсказаний, которые укрепляли уверенность в правильности выбранного пути. Однако наряду с удачами имели место и крупные неудачи. При этом, судя по мировой геофизической литературе, теоретический анализ причин и успехов, и неудач отсутствовал. Такая ситуация приводила к постепенной смене настроений; в 1978 г. появилась статья Р.А. Керра с симптоматическим названием “Землетрясения: прогноз, оказывающийся неуловимым” [Kerr, 1978]. Автор отодвигал решение проблемы прогноза, по крайней мере, на 10 лет, но и эта оценка оказалась слишком оптимистичной. С течением времени общее уныние лишь нарастало. В 1997 г. появилась статья [Geller, 1997], в которой явно говорилось, что 100 лет поисков надежных предвестников землетрясений не увенчались успехом – сомнению подвергались практически все обнаруженные предвестники. Подобные мысли встречаются и в других публикациях,

отражая предельное состояние пессимизма в проблеме прогноза: поскольку прогноз в принципе основывается на наличии каких-то предвестниковых явлений, то отвергать их – значит отвергать всякую возможность прогноза, даже принципиальную. Каково же реальное состояние проблемы предвестников в настоящее время?

По степени доверия к опубликованным сведениям о предвестниках их можно разделить на три группы – ложные, правдивые и, условно говоря, трудные для понимания. Если смешать эти три группы в одну и анализировать всю совокупность с полным доверием, а именно так сейчас и делается, то результат, конечно же, будет бессмысленным.

В группу трудных для понимания предвестников входят те из них, чье принципиальное существование на статистическом уровне не вызывает сомнений, но которые проявляются не всегда. Нам пока неясен физический механизм этих предвестников и даже качественно не удастся понять их в полной мере; они могут быть названы также предвестниками вероятностного типа.

Наибольший вред причиняют ложные сведения о предвестниках, когда за них выдаются вариации геофизических полей, не имеющие отношения к землетрясениям. Особое удивление вызывает то, что порой ложность сведений может быть установлена простыми, доступными способами, но авторы публикаций почему-то этим пренебрегают. Приведем примеры.

В работах [Казинский, 1970, 1972; Гриднев, Науменко-Бондаренко, 1991, 1992] утверждается, что обнаружены гравитационные предвестники тектонического землетрясения во вторых производных гравитационного потенциала Земли (первых производных ускорения силы тяжести) величиной порядка 1 Е. (Заметим, что эта величина находится на уровне случайных фоновых вариаций). Однако уже простейшая обработка этих “предвестников” – построение графика в координатах “величина предвестника – относительное эпицентрального расстояние” [Добровольский, 2005б] – показала, что они не могут быть предвестниками. Более аккуратные вычисления свидетельствуют, что предвестниковые вариации на три и более порядков меньше случайных вариаций и, следовательно, вообще не могут быть обнаружены. Более того, расчеты продемонстрировали, что предвестники даже по ускорению свободного падения реально могут быть обнаружены современными приборами лишь для довольно сильных землетрясений с $M > 6-7$. В частности, было обнаружено хорошее согласие теоретических результатов с данными по Таншанскому землетрясению 1976 г. с $M = 7.8$ [Добровольский, 2005б]. Аналогичным образом можно показать, что гравитационные вариации, описанные в статье [Druta, 1980], также предвестниками не являются. Получается, что большинство гравитационных предвестников, которые приводятся, например, в книге [Зубков, 2002], ложны.

В работе [Varotsos, Alexopoulos, 1984] рассказывается об обнаружении предвестников землетрясений в электрическом поле. Но и в этом случае несложный анализ и аккуратные вычисления на базе теории подготовки тектонического землетрясения [Добровольский, 1991] показывают, что из приведенных в публикации 40 примеров, по крайней мере, половина предвестниками не являются – они представляют собой фоновые вариации электрического поля. Более того, в тех случаях, когда вариации превышают фоновые и могут быть отнесены к предвестникам, для них на одном и том же относительном эпицентрального расстоянии обнаруживается разброс по величине, достигающий целого порядка. Это означает, что величина предвестника зависит не только от эпицентрального расстояния, но и от множества других параметров, которые следует принимать во внимание, если мы действительно хотим использовать эти предвестники для прогноза.

В ряде публикаций говорится о больших (в десятки метров) колебаниях уровня жидкости в скважинах, которые также относятся авторами к предвестникам землетрясений, причем весьма удаленных. Теоретические расчеты [Добровольский, 2005а] показывают, что такие вариации на несколько порядков превосходят расчетные. Подобное различие невозможно отнести на счет приближенности теории, которая в остальных случаях дает хорошее совпадение с данными полевых наблюдений, – это явно ложные сведения. Вместе с тем, имеется повод высказать важную мысль. Предположим, что действительно существует зона, в которой предвестники проявляются аномально большими величинами, выпадающими из общего распределения. Для реального прогноза, основанного на многих измерениях на большой площади, такие случаи, пожалуй, мало интересны, поскольку они вносят диссонанс в общее распределение, и в этом смысле их просто не следует принимать во внимание.

Наряду со сказанным, можно привести доказательства реального существования предвестников, которые выше были названы правдивыми. Довольно полно это сделано при решении прямых задач в монографиях [Добровольский, 1991; Dobrovolsky, 2000], где произведен расчет многих предвестников, давший хорошее совпадение с данными полевых наблюдений. Но есть более яркие доказательства существования правдивых предвестников. В статьях [Добровольский, 2004, 2006] решались задачи ретроспективного прогноза – определение места и магнитуды готовящегося землетрясения (найти время по использованным данным было невозможно в принципе). В работе [Добровольский, 2004] определения производились по данным сейсмического просвечивания и привели к совпадению с параметрами реально произошедшего землетрясения. В работе [Добровольский, 2006] использовались данные по вертикальным движениям поверхности Земли, решение задачи по которым дало удовлетворительное согласие с параметрами произошедших землетрясений. Любопытно, что в последнем случае по сведениям авторов погрешности измерений были велики и доходили до 25–50%. В общем, здесь имеет место простая логика – если прогноз по каким-то возмущениям геофизических полей дает правильные результаты, то эти возмущения являются реально существующими предвестниками.

Таким образом, существует довольно большое число действительно ложных сведений о предвестниках; их количество велико и составляет около 2/3 от общего числа данных. При поверхностном анализе, который обычно и проводят авторы обобщающих публикаций, нетрудно прийти к ошибочному выводу об отсутствии реальных предвестников – из ложных посылок можно сделать произвольные выводы. Обоснованный анализ предвестников и отсеивание ложных сведений о них становятся первоочередной задачей. Но мы убедились в другом – предвестники тектонического землетрясения реально существуют. Следовательно, прогноз тектонического землетрясения имеет реальный эмпирический базис, и поэтому проблема прогноза может быть решена.

Возвращаясь к вопросу о прогностических полигонах, отметим следующее. Конечно, многолетняя работа на них не была бесплодной, но своей основной задачи – создать методику прогноза или сформулировать содержательную стратегию прогнозных исследований тектонического землетрясения – они не выполнили. По существу, было доказано лишь следующее – решить проблему прогноза чисто эмпирическим путем невозможно, а пренебрежение теоретическими исследованиями фатально.

Современное состояние проблемы прогноза

Землетрясение является следствием акта разрушения напряженных земных недр, в результате которого часть полной высвобождаемой упругой потенциальной энергии среды превращается в энергию сейсмических колебаний. Подчеркнем, что энергия не

выделяется в очаге, а высвобождается в окружающем пространстве; очаг землетрясения не содержит энергии, не является ее источником, а является причиной ее высвобождения, источником волн. Очаг землетрясения характеризуется большим числом параметров, но важнейшими, характеризующими его с приемлемой полнотой являются три – положение гипоцентра, магнитуда и время возникновения разрыва. В прогнозе достаточно найти три эти характеристики, решив тем самым три независимых задачи прогноза.

Проблема прогноза землетрясения является в конечном итоге проблемой предсказания акта разрушения. Прогноз разрушения (особенно момента разрушения) даже инженерных конструкций из хорошо исследованных материалов является делом трудным: в процесс вмешивается большое количество случайностей, полный учет которых невозможен. С землетрясением дело обстоит одновременно и сложнее, и проще. Сложней потому, что мы хуже знаем свойства материала, слагающего Землю, а это ставит препону надежному теоретическому анализу; проще потому, что землетрясение по сравнению с лабораторными экспериментами на образцах более масштабное явление, и его предвестники, в частности, краткосрочные (основные предвестники времени события) проявляются на больших площадях и более ярко.

Прогноз тектонического землетрясения – частный случай класса прогноза точечных физических событий. Введем в рассмотрение *четырёхмерное* пространство – три обычных пространственных координаты и время. Введем также понятие *физической* точки, которая характеризуется не только упомянутыми четырьмя координатами, но и каким-либо набором физических свойств. (Примером может служить понятие материальной точки, где физическим свойством точки является масса.) Тогда можно говорить о рассматриваемом виде прогноза, как об определении координат и свойств физической точки в четырёхмерном пространстве. Под это определение попадает прогноз множества физически различных событий, в том числе и прогноз тектонического землетрясения, если физическим качеством точки будет магнитуда M . Следовательно, общепринятое “определение” – прогноз тектонического землетрясения есть нахождение места, силы и времени землетрясения – по сути является не определением, а лишь перечислением трех задач прогноза.

Прогноз тектонического землетрясения в принципе основан на факте, что землетрясение не внезапно. Существуют какие-то явления, свидетельствующие о созревании землетрясения в данном объеме среды (прогностические явления). Поэтому работу следует начинать с изучения и сведения этих явлений в систему, с построения некоторого общего сценария процесса подготовки – разработки теории подготовки. На базе такой теории мы можем решать *прямые задачи* – теоретически строить поля предвестников, оценивать их количественные характеристики. На определенном этапе наступит возможность решения *обратных задач* – по известным предвестникам найти какие-то характеристики будущего землетрясения, что будет уже задачей прогноза. Следовательно, *прогноз землетрясения есть обратная задача теории подготовки*. Это определение сохраняет смысл и в математическом отношении; оно влечет за собой еще один интересный вывод – прогноз землетрясения не является самостоятельной задачей или областью знания, это раздел теории подготовки.

В проблеме прогноза фундаментальным является факт существования предвестников, а, следовательно, и само понятие “предвестник”. Несмотря на то, что рассматриваемое понятие интуитивно представляется очевидным, необходимо дать его ясное определение. К тому же в геофизической литературе встречается конкурирующий термин “прогностический признак”, что лишь запутывает терминологическую ситуацию.

Понятие предвестника употребляется в разных областях знаний, и везде в соответствии со своим смыслом оно означает явление, предшествующее некоторому выделенному событию и в той или иной степени с ним связанное. Если распространить та-

кое толкование на землетрясения, то в этом случае, пропадает различие между терминами “предвестник” и “прогностический признак”; оба термина сливаются в один – предвестник землетрясения. Подготовка тектонического землетрясения вызывает выделяющиеся на фоне случайных вариаций возмущения разнообразных геофизических полей, которые трактуются как предвестники землетрясения. (В понятие геофизического поля здесь входят также сейсмический режим и атмосферные явления). Таким образом, имеем определение: *предвестники землетрясения – это вариации геофизических полей, вызванные процессом подготовки землетрясения, сопровождающие и отражающие именно этот процесс.*

Основываясь на современных данных, можно выделить два типа предвестников – вероятностные и детерминированные. Первые возникают не перед каждым землетрясением либо не обязательно после них происходит сейсмическое событие, поэтому прогноз по таким предвестникам может носить лишь вероятностный характер. Вторые (детерминированные) предвестники всегда предшествуют тектоническому землетрясению, но возможность их обнаружения должна обсуждаться отдельно. В зависимости от вида рассматриваемого геофизического поля можно говорить о деформационных, сейсмических, термических, гравитационных и других предвестниках.

Классификация предвестников по времени их проявления оказывается наиболее неопределенной. Существуют два подхода, при одном из которых предвестники классифицируются по абсолютному времени их проявления и делятся на долго-, средне- и краткосрочные. Такое деление не имеет физического обоснования и обычно производится для узкого диапазона магнитуд сильных землетрясений. При втором подходе предвестники определяются по их физическому смыслу, длительность их проявления связывается с магнитудой готовящегося события; в этом случае выделяются лишь два типа предвестников – долго- и краткосрочные.

Основой реального прогноза являются эмпирические данные, поставляемые службой полевых наблюдений, эмпирической геофизикой. Следовательно, необходима разработка методов первоначального анализа этих данных, систематизации и сжатия получаемой информации. Дальнейшая обработка данных осуществляется математическим путем с применением разных видов математической обработки в зависимости от поставленной задачи (выявление фоновых вариаций, тренда, предвестников и т.д.). Следовательно, в конечном итоге, прогноз оказывается *математической* задачей.

В целом, в прогнозе тектонического землетрясения можно выделить три составляющие – общие вопросы, вероятностный прогноз отдельного события и детерминированный прогноз отдельного события. Рассмотрим их последовательно.

Общие вопросы прогноза. К этому пункту относятся выбор стратегии, осмысление как проблемы прогноза в целом, так и ряда ее отдельных аспектов. Литература по этому вопросу обширна (см., например, [Страхов и др., 1999; Рогожин и др., 2002]), но не всегда при обсуждении учитываются известные решения конкретных задач прогноза, что отрывает общие рассуждения от реального прогноза.

К этому же пункту можно отнести сейсмическое районирование и аналогичные типы обработки многолетних данных по сейсмическому режиму. В этих исследованиях не решаются три классических задачи прогноза, тем более в отношении отдельных событий. Однако такие работы действительно нацелены на будущее и в общем плане определяют и обосновывают район прогностических исследований.

Вероятностный прогноз отдельного события основывается, прежде всего, на предвестниках вероятностного типа. Выделяются две группы предвестников, которые могут стать основой вероятностного прогноза, – изменения сейсмического режима рассматриваемого региона и атмосферные предвестники.

Подробная обработка сведений по сейсмическому режиму в отдельных районах позволяет выявить ряд предвестников, указывающих на процесс подготовки, с помощью которых можно с известной долей вероятности предсказать место, силу и время готовящегося события (или же решить отдельные задачи этой триады). Подобный относительно простой анализ кроме своего прямого результата позволяет сосредоточить в пространстве и времени более детальные прогнозные работы, избегая распыления сил и средств.

Работы по этой тематике начались довольно давно. Так, в статье [Федотов, 1968] исследовалась периодичность землетрясений на Камчатке, что позволило успешно предсказать Петропавловское землетрясение 24.11.1971 г. В монографии [Соболев, Пономарев, 2003] описывается алгоритм *RTL*, позволяющий производить анализ с помощью трех функций, не имеющих, правда, физического базиса. В той же монографии описан статистический критерий КОЗ (карта ожидаемых землетрясений).

Успешная разработка методов типичного вероятностного прогноза на разных отрезках времени осуществляется под руководством академика РАН В.И. Кейлиса-Борока. Работы этой школы многочисленны, для примера назовем лишь две [Kosobokov, Keilis-Borok, 1990; Keilis-Borok, Ismail-Zadeh, Kosobokov, 2001], в которых можно найти соответствующую библиографию.

К предвестникам второй группы (группы атмосферных предвестников) можно отнести, например, ионосферные вариации и появление облачных аномалий над разломами в период действия краткосрочных предвестников. С их помощью могут быть неплохо решены все три задачи прогноза. На эту тему существует немало интересных публикаций; для конкретности назовем [Дода, Новикова, Пахомов, 2006; Pulinetset et al., 2006]. Имеются и другие предвестники. Например, обнаружено изменение параметров сверхдлинных радиоволн при прохождении их в окрестности зоны подготовки сильных землетрясений.

Детерминированный прогноз отдельного события. Понятия “детерминированный прогноз” и “детерминированный предвестник” вводятся впервые. Предвестники детерминированного типа всегда сопровождают подготовку тектонического землетрясения. При этом следует отличать не вызывающий сомнения факт возникновения предвестника от реальной возможности его фиксации, которая зависит от чувствительности приборов и величины предвестника по сравнению с величиной фоновых вариаций рассматриваемого геофизического поля. В этом отношении показательна ситуация с упоминавшимися выше гравитационными предвестниками [Добровольский, 2005б]. Детерминированный прогноз во всех отношениях более сложен, но и дает более богатые результаты, даже выходящие за рамки собственно задач прогноза. Поэтому целесообразно остановиться на нем более подробно.

Прежде всего, к предвестникам детерминированного типа относятся деформирование среды при подготовке землетрясения и, как следствие, механические предвестники – перемещения, деформации, наклоны, гравитационные вариации, изменения скоростей сейсмических волн, вариации уровня флюидов в колодцах и скважинах. Деформирование среды по известным физическим законам вызывает появление электрических и магнитных аномалий, а также изменение трещиноватости, которое, в свою очередь, меняет интенсивность флюидных и термических потоков. Все эти явления и аналогичные относятся к детерминированным предвестникам, но следует понимать, что в зависимости от конкретных условий даже их максимальная величина может оказаться либо значительно ниже чувствительности приборов, либо заметно ниже величины фоновых вариаций. В этом случае обнаружение предвестника окажется невозможным, а современная теория подготовки должна “уметь” рассчитывать такие случаи.

В теории подготовки тектонического землетрясения [Добровольский, 1991] независимо от их физической природы выделяются два типа предвестников – долго- и краткосрочные, которые присущи землетрясениям всех магнитуд и различаются не конкретным временем проявления, а общими физическими процессами. Процесс подготовки и протекания землетрясения в наиболее общем виде можно представить как процесс формирования, развития и разрушения некоторого объема (неоднородности) с особыми свойствами в напряженных недрах Земли. Относительно длительная созидательная фаза возникновения и развития неоднородности сопровождается *долгосрочными* предвестниками, которые определяют место и степень ее развития. Размеры неоднородности коррелируют с величиной энергии, которая будет высвобождена при разрушении неоднородности магистральным разрывом.

Фаза возникновения и развития сменяется более короткой начальной фазой разрушения (от конца фазы развития до главного толчка), которая сопровождается *краткосрочными* предвестниками (форшоки, пластические подвижки и т.п.) – высоконадежными признаками времени приближающегося события.

Заключительная фаза разрушения – афтершоки – в данной работе не рассматривается.

Таким образом, наблюдая за долгосрочными предвестниками, мы можем определить место готовящегося землетрясения и проследить развитие неоднородности, т.е. накопление энергии. Проявление краткосрочных предвестников свидетельствует о завершении развития неоднородности, определяя окончательную магнитуду и время возникновения события.

В математической теории подготовки для описания процесса подготовки используется некоторое множество параметров, которые характеризуют не только собственно процесс подготовки, но и свойства окружающей среды (земной коры). А это означает, что при достаточно большом числе предвестников (их должно быть не меньше, чем искомым параметров) при достаточной точности их определения можно установить также свойства земной коры на больших базах в естественном залегании, что является интересным “побочный” результат.

Примеры ретроспективного детерминированного прогноза по определению места и магнитуды землетрясения содержатся в работах [Добровольский, 2004, 2006].

Характеристика района работ

В настоящее время имеется возможность весьма подробного геологического описания строения земной коры в любом конкретном районе работ. Однако в большинстве случаев эти сведения оказываются не только ненужными, но из-за их большого объема и сложности создается иллюзия невозможности реального прогноза. Недаром во многих публикациях, содержащих сомнения в возможности прогноза, авторы ссылаются именно на сложность строения земной коры и протекающих в ней процессов. Геологические сведения обладают существенным недостатком – обычно они являются качественными и не дают возможности количественно оценить, насколько необходимо принимать во внимание эту сложность при реальном прогнозе.

В неменьшей степени тем же недостатком обладает и геофизическое описание района работ. Зачастую свойствам среды, которые действительно важны при работах по прогнозу, не уделяется должного внимания. Например, не существует общепринятого определения разлома, во многих публикациях отсутствуют количественные данные о геофизических, а также, что особенно важно, механических свойствах конкретных разломов.

Становится ясным, что при развертывании работ по прогнозу в конкретном районе первоочередной задачей является составление перечня свойств, характеризующих этот район, которые действительно необходимы для будущих работ. Вероятно, на начальном этапе работ в том или ином районе достаточно базисных геологических сведений о нем. К ним можно отнести сведения о наличии разломов и им подобных структурных элементов, а также характеристику общего хода геологических процессов, что позволит получить независимое представление о виде напряженно-деформированного состояния района.

Изучение сейсмичности района и исследование механизмов очагов землетрясений имеют двоякое значение – распределение очагов в пространстве и времени является основной сейсмического прогноза, а анализ механизмов очагов дает представление о поле тектонических напряжений.

Для изучения и анализа предвестников землетрясений определяющими являются геофизические свойства горных пород, но и в этом случае не имеет смысла подробное и всеобъемлющее исследование всех свойств. Безусловно, необходим анализ и учет механических характеристик среды, поскольку в процессах подготовки и протекания тектонических землетрясений механические процессы играют ведущую роль. Необходимость изучения других геофизических свойств определяется видом предвестника, его физической природой. Например, для хорошего исследования тектономагнитных предвестников следует знать пьезомагнитные свойства пород рассматриваемого района.

Подготовка землетрясения (особенно сильного) разворачивается на больших площадях и в огромных объемах горных пород; понимается, что эти площади и объемы “большие” и “огромные” по сравнению с размерами будущего очага и практически всеми неоднородностями земной коры. Напомним, что разлом является лишь частным видом неоднородностей, у которого один размер значительно меньше двух других. В результате при проявлении большинства предвестников происходит существенное осреднение свойств среды, при котором учет детального строения может потерять смысл. Для примера обратимся к работам [Добровольский, 2004, 2006], где показано, что результаты решения обратных задач для уже произошедших землетрясений привели к удивительному совпадению теоретических сведений с данными реальных землетрясений, хотя расчеты производились для *однородной* земной коры, т.е. заведомо существующие неоднородности игнорировались. Исключение может представить анализ “точечных” измерений – показания двух деформометров с короткой базой могут существенно различаться, если один из них расположен на разломе.

Таким образом, мы еще раз убеждаемся в том, что изучение свойств района работ должно производиться с учетом конкретной задачи.

Задачи Службы прогноза

Создание Службы прогноза – организационная форма перехода к практическому прогнозу. Цель Службы прогноза – создание методики прогноза и осуществление реального прогноза в конкретном районе.

Службу прогноза целесообразно создавать для осуществления прогноза именно в каком-либо отдельном районе, поскольку в этом случае возможно изучение выбранного района и его особенностей с необходимой степенью достоверности и подробности. Как обычно, в начальный период наиболее сложными оказываются организационные и кадровые вопросы, и здесь не следует пренебрегать опытом создания и функционирования известных прогностических полигонов; особенно важно учесть ошибки их работы.

Возможные основные направления работы Службы прогноза неоднократно обсуждались в разных публикациях. Длительное функционирование созданное Службы несомненно внесет коррективы в начальный план и выделит приоритетные задачи. Тем не

менее, имеет смысл еще раз отметить исходные положения, обратив внимание на то, что не все перечисленные ниже пункты рассматривались ранее.

Выбор защищаемого объекта. Сейсмичность распределена по поверхности планеты неравномерно. Организовать Службу прогноза даже только для одного сейсмоактивного района, который нередко охватывает территории нескольких государств, практически невозможно. Если считать, что предсказание есть одна из форм защиты, то, прежде всего, необходимо выбрать защищаемый объект, по отношению к которому будут осуществляться прогнозные работы. В качестве защищаемого объекта может выступить крупный экономический и культурный центр или ряд близко расположенных подобных объектов.

Существуют разные эмпирические формулы (например, [Шебалин, 1974]), которые связывают балльность, магнитуду, эпицентральный расстояние и глубину гипоцентра события. На основании этих зависимостей для выбранного объекта можно ввести понятия “опасного землетрясения” и “опасной области”, определив их положение и границы.

Характеристика района. Для окрестностей выбранного объекта следует собрать возможно более полные сведения о сейсмичности, включая исторические данные, об основных геологических характеристиках, механических свойствах горных пород и проявлениях предвестников различной физической природы. Выбор наиболее надежных физических типов предвестников выделяет особенно важные геофизические свойства района, которые следует определить. Обработка этих сведений с применением теории подготовки должна дать ответы на вопросы о положении пунктов наблюдения, густоте сети наблюдательных пунктов и их материальном оснащении. По-видимому, заключительным результатом такой работы должен быть ответ на вопрос о возможности прогнозирования землетрясений, готовящихся в опасных для данного объекта зонах.

Математическое моделирование прогноза землетрясения. Успешное решение прямых задач теории подготовки, в которых производился расчет предвестников, согласно с данными полевых наблюдений свидетельствуют об эффективности развитой теории [Добровольский, 1991]. Следовательно, для любой точки района мы можем рассчитать возможные предвестники землетрясений, прежде всего, тех, что готовятся в опасных для данного района зонах. Нетрудно осложнить эти данные случайной компонентой. Полученные результаты можно использовать уже для решения задач прогноза, для отработки и совершенствования методики прогноза, для суждения о возможности реального прогноза, исходя из наличия приборов с заданной чувствительностью. Для сейсмического прогноза хороший исходный материал поставляют подробные каталоги землетрясений.

Полнота прогноза. Для каждого сейсмического события, в отношении которого была предпринята попытка прогноза, следует найти причину, по которой оно было (или не было) предсказано. Такие сведения необходимы для совершенствования методики и оптимизации сети наблюдений; они составят также основной фактический материал для отчетности о работе Службы прогноза.

Длительное функционирование Службы прогноза неизбежно выдвинет ряд новых задач. Впрочем, общим местом во многих программах прогноза уже стала необходимость взаимодействия работников Службы прогноза с местной администрацией и осуществление некоторой доли закрытости при реальном прогнозировании.

Сильные землетрясения – довольно редкие события даже в сейсмоактивных районах. По этой причине и по ряду других может случиться, что в течение многих лет Служба прогноза не сможет выдавать реальные результаты, для получения которых она была создана. Подобная ситуация может вызвать нежелательные, вредные для дела

психологические последствия и затруднить научный рост работников Службы. Это также следует принимать во внимание, если мы хотим, чтобы Службы прогноза функционировала эффективно.

Выводы

1. Предвестники тектонических землетрясений объективно существуют и проявляются в различных геофизических полях как в твердой Земле, так и в атмосфере. Однако ситуация с предвестниками осложняется тем, что примерно 2/3 опубликованных вариаций, трактуемых как предвестники, ими не являются, т.е. 2/3 сведений являются ложными. Научиться отсеивать ложные сведения – первоочередная задача успешного анализа.

2. Проблема прогноза тектонического землетрясения, балансирующая до недавнего времени на грани искусства, выходит из этой области. Разработан ряд научных методов прогноза и получено несколько решений таких задач; выделяются вероятностный и детерминированный виды прогноза. Таким образом, показано существование решения проблемы прогноза. В этом смысле проблему можно считать решенной и работу нужно переводить в практическую плоскость.

3. Одной из базисных практических задач становится разработка комплекса основных характеристик района, необходимых для правильной постановки работ по прогнозу. К ним, например, относятся напряженно-деформированное состояние района, перечень наиболее информативных предвестников и свойств земной коры, обеспечивающих проявление этих предвестников.

4. Прогноз тектонического землетрясения – многоплановая задача, а сейсмоактивные регионы, несмотря на множество общих черт, имеют заметные различия. Поэтому, занимаясь проблемой прогноза вплотную, следует принимать во внимание все аспекты цикла землетрясения и привлекать к решению проблемы прогноза специалистов разных направлений. Только длительное функционирование в конкретном районе специально организованной и квалифицированной Службы прогноза сможет определить наши реальные шансы в прогнозе тектонического землетрясения.

Литература

- Голицын Б.Б. Избранные труды. Т. 2. Сейсмология. М.: АН СССР, 1960. 490 с.
- Гриднев Д.Г., Науменко-Бондаренко И.И. Измерение временных вариаций вторых производных потенциала силы тяжести на Гармском геофизическом полигоне // Докл. АН СССР. 1991. Т. 319, № 5. С.1102–1105.
- Гриднев Д. Г., Науменко-Бондаренко И. И. О некоторых закономерностях временных вариаций вторых производных потенциала силы тяжести на Гармском геофизическом полигоне // Докл. АН СССР. 1992. Т. 327, № 1. С.55–59.
- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ РАН, 1991. 218 с.
- Добровольский И.П. Прогноз тектонического землетрясения: определение места и энергии землетрясения по данным сейсмического просвечивания // Физика Земли. 2004. № 12. С.31–41.
- Добровольский И.П. Гидродинамические явления // Физика Земли. 2005а. № 1. С.89–96.
- Добровольский И.П. Гравитационные предвестники тектонического землетрясения // Физика Земли. 2005б. № 4. С.23–28.
- Добровольский И.П. Прогноз тектонического землетрясения: определение места и энергии землетрясения по вертикальным перемещениям земной поверхности // Физика Земли. 2006. № 5. С.78–82.
- Дода Л.Н., Новикова Н.Н., Пахомов Л.А. Прогнозирование и космический мониторинг предвестников землетрясений: проблемы, реалии, надежды // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. V научно-практическая конференция 15–16 ноября 2005 г. Доклады и выступления. 2006. С.114–120.

- Зубков С.И. Предвестники землетрясений. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 140 с.
- Казинский В.А. О временных вариациях вторых производных потенциала силы тяжести // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192, № 4. С.790–792.
- Казинский В.А. Гравитектонический эффект, наблюдаемый в окрестности Каджаранского очага землетрясений // Докл. АН СССР. 1972. Т. 203, № 3. С.574–577.
- Рогожин Е.А., Юнга С.Л., Лутиков А.И., Захарова А.И. Комплексный подход к решению проблемы прогноза землетрясений // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: Труды научно-практической конференции. М.: МЧС РФ, 2002. С.244–250.
- Соболев Г.А., Пономарёв А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Страхов В.Н., Макалкин А.Б., Рогожин Е.А. Актуальные проблемы геофизики // Вестник ОГГН РАН. № 2(8). М., 1999. С.43–105.
- Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1968. С.121–150.
- Шебалин Н.В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1974. 54 с.
- Dobrovolsky I.P. Theory of the earthquake preparation. Moscow: UIPE RAS, 2000. 134 p.
- Druta E. Normal earthquake gravitational precursors from earth-tide data. Approach earthquake predict // Proc. Int. Symp. Earthquake Predict: Anatolian fault zone, Istanbul, March 31 – April 5, 1980. Braunshweig, Wiesbaden, 1982. P. 262 – 277.
- Geller R. Earthquake prediction: A critical review // Geophys. J. Intern. 1997. V. 131. P.425–451.
- Kosobokov V.G., Keilis-Borok V.I. Localization of intermediate-term earthquake prediction // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, N 12. P.45–59.
- Keilis-Borok V.I., Ismail-Zadeh A.T., Kosobokov V.G. Non-linear dynamics of the lithosphere and intermediate-term earthquake prediction // Tectonophysics. 2001. N 338. P.35–45.
- Kerr R.A. Earthquakes: Prediction Proving Elusive // Science. 1978. V. 200, N 4340. P.419–421.
- Kövesligethy S.L. Hysteresis Seismique // Math. und Naturwiss. Ber. Ungarn. 1908. N 3. P.212.
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Ciraolo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajevka M., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Kotsarenko A. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003 // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P.835–849.
- Reid H.F. The California Earthquake of April 18 1906. V. 2. The Mechanics of the Earthquakes. The Carnegie Inst. Washington. 1910. 192 p.
- Ruihao L., Zhaozhu F. Local gravity variations before the Tangshan earthquake ($M = 7.8$) and the dilatation process // Tectonophysics. 1983. V. 97, N 1/4. P.159–169.
- Varotsos P., Alexopoulos K. Physical properties of the variations of the electric field of the Earth preceding earthquake // Tectonophysics. 1984. V. 110, N 1/2. P.73–98.

Сведения об авторе

ДОБРОВОЛЬСКИЙ Игорь Петрович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 8(499)614-06-32. E-mail: dipedip@gmail.com

ON THE TECTONIC EARTHQUAKE PREDICTION

I.P. Dobrovolsky

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. There is a rule in fundamental sciences: the problem is considered as solved if the method of the solution is specified. In other words, this rule means the solution of the problem exists. We assert that in this sense, the problem of the tectonic earthquake prediction can be counted as solved and the problem needs to be transferred in practical realization. 4 questions are discussed in article: 1) the brief review and the current status of the precursors problem, 2) the current status of the prediction problem, 3) the characteristic of area of works and 4) the tasks of prediction service.

Keywords: earthquake, precursor, prediction.