УДК 550.343

О ПРИЧИНАХ КРИЗИСА В ПРОБЛЕМЕ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПУТЯХ ВЫХОДА ИЗ НЕГО*

Певнев А.К. – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Аннотация. Обоснована несостоятельность стратегии прогноза землетрясений, базирующейся на попытках решения проблемы исключительно методами обратных задач, которые, вопреки предпосылкам, оказались некорректными. Показано, что решение проблемы возможно методами прямых задач благодаря тому обстоятельству, что в процессе подготовки очага землетрясения участвует земная поверхность и, следовательно, этот процесс можно отслеживать с помощью специального геодезического мониторинга непосредственно на земной поверхности.

Подготовка землетрясения, прогноз, причины кризиса, геодезический мониторинг.

ABOUT THE REASONS OF CRISIS IN THE PROBLEM OF THE FORECAST OF EARTHQUAKES AND WAYS OF THE OUTPUT FROM IT

Pevnev A. K. – *The O.Yu. Smidt Institute of the Earth Physics, RAS, Moscow*

Abstract. It is proved insolvency of strategy of forecast of earthquakes which find in attempts of decision of problem by solely methods of inverse problems that notwithstanding premises become wrong. It is shown this decision of problem by possible methods of direct problems because of these circumstances that in process of preparing the centre of earthquake participates the terrestrial surface and this process possible to track by means of special geodetic checking for terrestrial surface directly.

Preparation of earthquakes, the forecast, the reasons of crisis, geodetic checking.

О причинах кризиса в проблеме прогноза землетрясений

В классической постановке решение проблемы прогноза землетрясений требует ответы на следующие три вопроса – где?, какой силы? и когда?, то есть осуществления прогнозов места, максимально возможной силы и времени. В этом перечне вопросов крайне важно следующее обстоятельство – необходимо ли иметь ответы на указанные вопросы одновременно или существует определенная последовательность их получения? За ответом обратимся к классику – творцу первой, научно обоснованной программы решения проблемы прогноза землетрясений в нашей стране Григорию Александровичу Гамбурцеву: «Землетрясения происходят в результате быстрого разрешения напряжений, относительно медленно нарастающих в земной коре. Таким образом, первая часть задачи предвидения землетрясений состоит в обнаружении этих напряжений. Вторая часть её состоит в определении таких особенностей в процессе нарастания напряжений, которые непосредственно предшествуют их разрешению» (Научное наследие…, 2003, с. 228).

Таким образом, согласно Г.А. Гамбурцеву начинать прогноз землетрясения нужно с обнаружения места расположения готовящегося очага и очевидно его размеров («обнаружение этих напряжений»), а потом уже думать о прогнозе времени, исследуя особенности «в процессе нарастания напряжений, которые непосредственно предшествуют их разрешению», то есть определяя законы разрушения горных пород непосредственно в природных условиях – в «созревшем» очаге землетрясения. Это полностью согласуется и с классическим порядком перечисления трех составляющих прогноза. Однако некоторые прогнозисты считают, что можно обойтись и без прогноза места, ограничившись лишь приблизительными прогнозами силы и времени. Дающие такие прогнозы очевидно забывают о том, что любой прогноз времени сильного землетрясения без указания точного места его реализации всегда оп-

* Публикуется в порядке обсуждения

равдается, так как Землю ежегодно сотрясают около 20 сильных и сильнейших землетрясений и поэтому с ошибкой во времени примерно в месяц всегда можно безошибочно прогнозировать на Земле сильное землетрясение.

Следует отметить, что соображения о приоритете прогноза места очага готовящегося землетрясения в решении этой проблемы были высказаны очень давно.

Вот что по этому поводу еще в позапрошлом веке было написано первым российским сейсмологом А.П. Орловым: «так как земная кора потрясается не только ежегодно, но даже ежемесячно, ежесуточно, а может быть даже и ежечасно в том или другом месте, а поэтому всякое предсказание на будущее время, при неопределённости указания места относительно землетрясения, исполнится непременно» (Орлов, 1887, с. 28).

Г.П. Горшков в книге, посвящённой Александру Петровичу Орлову, придал этим соображениям более категоричный оттенок: «Можно ещё подкрепить аргументацию А.П. Орлова современными сведениями: по мере развития сейсмической службы количество регистрируемых землетрясений быстро возрастает, и указание момента будущего землетрясения без указания места явно теряет смысл» (Горшков, 1955, с. 45).

Таким образом, мы имеем все основания говорить о том, что практический интерес может иметь лишь прогноз силы и времени разрушения совершенно конкретного готовящегося очага землетрясения, местоположение которого точно известно, то есть прогноз места этого очага уже осуществлен. Вот здесь и начинаются проблемы – дело в том, что с помощью реализуемой в настоящее время стратегии прогноза землетрясений определить точное местоположение очага землетрясения невозможно (Певнев, 2003; 2007). Попробуем обосновать это неутешительное утверждение.

Как известно, существующая методология решения проблемы прогноза землетрясений базируется не на обнаружение прямых признаков, прямых указателей того, что в данном конкретном объеме горных пород идет процесс подготовки очага землетрясения, а на определение местоположения такого очага методами решения обратных задач по набору разрозненных аномалий в различных полях.

Предполагалось, что так можно будет определять точное местонахождение готовящегося очага землетрясения и отслеживать происходящие в нем процессы. Априори было принято, что благодаря таким исследованиям можно будет установить детерминированные функциональные зависимости между исходными данными (указанными аномалиями) и искомым решением (источником этих аномалий – готовящимся очагом землетрясения), отвечающие условиям корректно поставленной задачи. Однако результаты длительных и интенсивных исследований опровергли эти ожидания – проблема находится в тупике. О современном кризисе в проблеме прогноза землетрясений сказано и написано уже достаточно.

Почему же рассматриваемая методология непригодна для решения проблемы прогноза землетрясений?

Есть веские основания считать, что одну из главных причин рассматриваемого кризиса следует искать в особенностях строения и других характеристиках реальной геолого-геофизической среды сейсмогенного слоя земной коры, в которой зарождаются, созревают и разрушаются очаги коровых землетрясений. Если бы эта среда была идеальной, то есть однородной, изотропной и сплошной, то обратные задачи, нацеленные на обнаружение готовящихся очагов землетрясений может быть и были бы корректно поставленными задачами и поэтому позволили бы определять детерминистские функциональные зависимости между исходными данными (измеряемыми аномалиями в различных полях) и искомым решением – очагом землетрясения. Но реальная геолого-геофизическая среда таковой не является. Это – и не однородная и не изотропная, и к тому же разбитая на блоки разной крупности, раздробленная не сплошная среда.

Второй главной причиной кризиса является отсутствие надежных фильтров, позволяющих производить выборку аномалий, порождаемых только лишь исследуемым очагом. Есть основания полагать, что, согласно принципу суперпозиции, аномалии, наблюдаемые в различных геофизических полях, являются суммарной величиной, вклад в которую вносит широкий спектр различных процессов – в первую очередь деформационных. В этот список можно включить сейсмические процессы: подготовка очагов землетрясений, а также различные фоновые процессы – локальные, региональные и глобальные. Можно полагать, что среди глобальных процессов определяющими являются деформационные процессы, порождаемые неравномерным вращением Земли. В настоящее время нет возможности определить влияние на аномалию каждого из этих процессов, но, и самое главное, из фиксируемых аномалий достоверно выделить только те, которые порождаются тем или иным готовящимся очагом землетрясения.

Таким образом, можно говорить о том, что анизотропия и разномасштабная кусковатость горных пород земной коры, их механические и структурные неоднородности, существенное влияние жидкой фазы на прочность горных пород (эффект Ребиндера), а также отсутствие фильтров для достоверной выборки аномалий, порожденных исключительно исследуемым очагом, переводят предполагавшуюся априори корректность обратных задачи в разряд абсолютной некорректности. Именно это и не позволяет устанавливать искомые однозначные функциональные зависимости, то есть точно локализовать источник порождения различных аномалий – готовящийся очаг землетрясения.

Правомерность изложенных соображений подтверждена и экспериментально – долговременные интенсивные исследования, нацеленные на решение проблемы методикой «аномалий», закончились безрезультатно – проблема находится в тупике.

Многие причину «неуспеха» стратегии аномалий видят в дефектах наблюдательных систем – их разреженности. Полагают, что стратегия аномалий заработает, если прогнозная система будет существенно сгущена. Представление о том, что исключить влияние указанных причин, то есть некорректную задачу перевести в разряд корректно поставленных задач можно существенным сгущением пунктов наблюдений, является заблуждением. Это наглядно продемонстрировало непредсказанное Калифорнийское землетрясение 1989г., которое произошло в середине самой густой в мире наблюдательной сети.

Вот что о возможностях «количественного» решения проблемы прогноза в свое время было написано академиком В.И. Кейлис-Бороком:

«Долгое время работы по прогнозу землетрясений ориентировались в основном на расширение системы наблюдений. Калифорнийское землетрясение наглядно показало нам, насколько этого недостаточно. Оно произошло в середине самой мощной в мире наблюдательной сети, с тысячами датчиков, телеметрией, полной компьютеризацией» (Кейлис-Борок, 1989).

Таким образом, несостоятельность используемой в настоящее время стратегии «аномалий» (метод обратных задач) для решения проблемы прогноза землетрясений можно считать доказанной.

Исторический аспект формирования представлений о возможностях геодезического метода в обнаружении очагов готовящихся землетрясений

А был ли выбор стратегии аномалий неизбежным? Для поиска ответа на этот вопрос совершим краткий экскурс в историю – вернемся примерно на 120 лет назад, когда впервые были высказаны соображения о целесообразности использования метода повторных геодезических измерений для изучения сейсмических процессов. Эти соображения принадлежат выдающемуся русскому ученому, геологу и сейсмологу И.В. Мушкетову. Ещё в 1887 году, сразу после Верненской сейсмической катастрофы, им для указанных целей был проложен нивелирный ход от г. Верного (Алма-Ата) до берегов озера Иссык-Куль. Вот как в

описании программы работ экспедиции, изучавшей последствия Верненского землетрясения, было изложено И.В. Мушкетовым назначение этого нивелирного хода:

«Топографу Рафаилову поручалась нивелировка от г. Верного через два хребта: Заилийский и Кунгей-Алатау до озера Иссык-куль (около 150 верст), а также тригонометрическое определение высоты некоторых выдающихся вершин. Нивелировка эта, имея важное значение для составления точного геологического разреза через два хребта, вместе с тем послужит основанием для будущих определений изменений высоты гор» (Мушкетов, 1903, с. 3).

По настоянию И.В. Мушкетова в 1900 г. были выполнены повторные триангуляционные измерения в эпицентральной зоне Ахалкалакского землетрясения 1899 г. Вот что по этому поводу написали его ученики В.Н. Вебер и П.Е. Воларович:

«Проф. Мушкетов поднял вопрос об изменении координат тригонометрических пунктов после землетрясений и поэтому ходатайствовал перед начальником Кавказского Военно-Топографического Отдела о производстве поверочной триангуляции в Ахалкалакском уезде, что и было исполнено летом 1900 г. Свое пожелание о производстве повторных определений географических пунктов Иван Васильевич высказал ещё в своей монографии о Верненском землетрясении 28-го мая 1887 г., но производство поверочной триангуляции после землетрясений впервые в России было сделано только для Ахалкалакского землетрясения 19-го декабря 1899 г. Хотя поверочная ахалкалакская триангуляция и не обнаружила особенно резких изменений координат, однако всё-таки возможность таких измерений отрицать нельзя, поэтому, надо надеяться, что идея проф. И.В. Мушкетова найдёт себе применение при изучении русских землетрясений» (Мушкетов, 1899, с. VIII).

Следует отметить, что Ахалкалакская триангуляция и не могла обнаружить «особенно резких изменений координат», так как это землетрясение было землетрясением средней силы с магнитудой всего лишь около 5,4 (M=5,4), а, как теперь известно, при такой магнитуде смещения по разлому составляют не более 10 см, в то время как точность определения координат пунктов триангуляции в то времена была намного грубее.

К сожалению, блестящий научный путь И.В. Мушкетова был прерван ранней смертью в 1902 г., но его идея использования повторных геодезических измерений для изучения землетрясений вскоре была блестяще реализована в США в начале 20-го века.

В 1906 г. в Калифорнии случилась сейсмическая катастрофа (M=8,4), при которой общая длина при землетрясении участка разлома Сан-Андреас исчислялась сотнями километров (более 400 км), а взаимные смещения смежных бортов разлома измерялись метрами (до 6 м). После землетрясения были выполнены повторные триангуляционные измерения на обширной территории, полностью и с большим запасом перекрывшей его эпицентральную зону. Результаты этой работы превзошли все ожидания: благодаря внушительным размерам деформированного землетрясением участка земной поверхности и её значительным смещениям даже при редком расположении пунктов триангуляции удалось достоверно определить действительные величины их смещений на различных расстояниях от разлома. Именно эти геодезические данные и были основой предложенной Г.Ф. Рейдом «Теории упругой отдачи». Рейд установил, что при подготовке очага землетрясения прямые деформационные признаки проявляются на земной поверхности и что их можно непосредственно отслеживать методом повторных геодезических измерений. Ниже приведены его взгляды на место и возможности геодезического метода в проблеме прогноза землетрясений.

«Так как разрыв не может возникнуть без предварительно накопленных напряжений, то просто нужно выбрать метод для обнаружения накапливающихся напряжений с тем, чтобы заранее знать, что готовится землетрясение. Разрыв произойдет

вдоль линии наибольших напряжений или вдоль какого-нибудь старого разлома, где породы более слабые. Сдвиговое напряжение, необходимое для разрыва гранита, заключено между величинами 1/2000 и 1/1500, или возможно немного более, что легко измеримо.

Если в регионе, где были землетрясения, мы установим ряд столбов, скажем через один километр, под прямым углом к предполагаемой или известной линии разлома и если мы будем время от времени измерять направления линий, их соединяющих, и их различия высот, то по их изменениям мы обнаружим накапливающиеся напряжения. Если напряжения станут достаточно большими, мы будем ждать землетрясение, а местоположение наибольшего напряжения или расположение старого разлома будет местом, где может произойти землетрясение. Повторение точных геодезических измерений выявит относительные смещения различных пунктов и таким образом покажут есть ли накопление напряжений, но пунктов обычно бывает недостаточно для обнаружения местоположения наибольших напряжений» (Reid, 1909, p. 5).

Следует подчеркнуть, что с момента этой публикации прошло уже 100 лет!

Вызывает удивление и восхищение гениальная догадка Г.Ф. Рейда о действительных возможностях геодезического метода в решении проблемы прогноза землетрясений, которая позволила ему первому предложить научно обоснованную стратегию обнаружения очагов готовящихся землетрясений методом решения прямой задачи.

Следует отметить, что в «Теории упругой отдачи» есть лишь одна принципиальная ошибка, допущенная Г.Ф. Рейдом при определении вида деформационного признака подготовки очага землетрясения. В результате ошибочных логических рассуждений и неудачного лабораторного эксперимента он пришел к выводу, что сейсмогенная деформация должна быть деформацией однородного сдвига, тогда как в действительности эта деформация является деформацией изгиба (Певнев, 2003).

О принципиальных ошибках в выводах о реальных деформациях земной поверхности, возникающих из-за формальных подходов при анализе результатов геодезических измерений

Судя по публикациям (Рихтер, 1963) американскими геодезистами были сделаны попытки реализовать эту возможность на разломе Сан-Андреас, но сделано это было крайне неудачно: не были созданы специальные геодезические построения и, к тому же, делалась ставка на очень быстрое получение положительного ответа, в то время как такие исследования должны рассчитываться на десятки и более лет. Вполне естественно, что все это закончилось дискредитацией прекрасной идеи. Вот как это описано известным американским сейсмологом Ч.Ф. Рихтером.

«Из приведенных схем (схем упругой отдачи. А.П.) следует, что перед сильным землетрясением на поверхности должны нарастать деформации. Это можно было бы обнаружить, проводя частые повторные триангуляции. Предполагалось, что имеющиеся геодезические данные действительно указывали на подобные смещения, происходившие до 1906 г. Поэтому в Калифорнии проводилось много триангуляций, но в целом смещения отмечались лишь после землетрясения, а не до него. Ложная тревога поднялась в 1925 г., когда после предварительной редукции геодезических данных обнаружили, что пик Гавиота к западу от Санта-Барбары сместился примерно на 25 футов. Это привело к зловещим предсказаниям о неизбежности сильного землетрясения, но заподозренные смещения рассеялись, когда были подведены окончательные итоги триангуляционных работ.

Так случалось не один раз. Люди, ведущие геодезическую съемку в поле, приходили к убеждению, что обнаружены систематические смещения; однако после редукции наблюдений в Вашингтоне выяснялось, что эти смещения находятся в пределах погрешности. Возникло подозрение, что полученные результаты могли быть обусловлены методом редукции наблюде-

ний, при котором наблюдаемая невязка разбрасывается равномерно, благодаря чему влиянием сравнительно больших смещений в одной или двух точках можно пренебречь, если предположить, что они накопились за счет малых вариаций. С другой стороны, если принять результаты, как они есть, то получается, что любые ранние медленные смещения проявляются только на глубине и что наблюдаемые смещения происходят только при действительном разрыве, когда он распространяется до поверхности, Но такое объяснение нельзя считать удовлетворительным» (Рихтер, 1963, с.182-183).

Очевидно, это противоречие между измеренными в поле и уравненными в камеральных условиях данными явилось результатом формального подхода геодезистов к оценке выполненных измерений – любое расхождение в полученных результатах, превосходящее определенный предел считается ошибкой измерений**.** Это напоминает ситуация с «ребенком, которого выплескивают вместе с водой». В нашем случае «ребенок» – это бесценные, непосредственно измеренные деформационные предвестники землетрясения**.**

Таким образом, началом кризиса в проблеме прогноза землетрясений можно считать предпринятые в начале века американскими учёными неудачные попытки реализовать на практике идеи Г.Ф. Рейда. Это неудачное начало привело к печальным последствиям: упустив возможность обнаруживать непосредственный деформационный предвестник методом решения прямой задачи, исследователи направили все усилия на реализацию проблемы прогноза методом решения обратных задач.

Очевидно, синдром неуспеха у американских ученых был настолько силен, что и теперь геодезические построения на сейсмогенных разломах США рассчитаны на что угодно, но только не на обнаружение мест готовящихся очагов землетрясений. Можно почти не сомневаться в том, что на сегодняшний день это является единственной причиной отсутствия точного прогноза мест подготовки сейсмических катастроф в Калифорнии.

Ярким примером сказанному являются случившееся неожиданным разрушительное землетрясение в Сан-Франциско в 1989 г. и полностью провалившийся широко разрекламированный прогноз в Паркфилде; такое положение с прогнозом будет сохраняться до тех пор, пока американские учёные не изменят свое отношение к геодезическому методу и не заставят служить прогнозу землетрясений сильные стороны этого метода. В свое время я призывал американских геодезистов из Геологической службы США (занимающихся прогнозом землетрясений) вернуться к реализации идей «Теории упругой отдачи», но получил удивительный ответ – прогноз землетрясений «мы делаем рутинным способом». Все это было бы крайне смешно, если бы не было так печально.

Можно считать, что одним из очень печальных последствий паркфилдского эксперимента является то, что он в очередной раз подорвал у американских ученых (и не только у них) веру в возможность осуществления прогноза землетрясений.

Итак, мы имеем все основания полагать, что ошибочному выбору стратегии аномалий способствовали два обстоятельства: крайне неудачная попытка американских геодезистов решать проблему прогноза землетрясений методом прямых задач, приведшая к дискредитации этого метода, а также скудные в те времена знания о строении и свойствах реальной геолого-геофизической среды.

Дискредитация американских исследователей «Теории упругой отдачи», конечно же, не могла остаться незамеченной прогнозистами других стран. Чего только не придумывали и не придумывают до сих пор некоторые ученые, пытаясь доказать неправомерность «Теории упругой отдачи». В качестве примера приведем крайне впечатляющие соображения по этому вопросу известного новозеландского сейсмолога Дж.А. Эйби:

«Теория упругой отдачи, безусловно, дает удовлетворительное объяснение деформациям, которые можно наблюдать на

поверхности земли, однако исследование разломов на поверхности мало что говорит нам об условиях в очаге, которое даже в случае самых неглубоких толчков находится на глубине нескольких километров. Возможно, что бóльшая часть энергии высвобождается не от разрядки упругих напряжений, а от чего-то другого, и разломы на поверхности – лишь одна из форм сейсмических нарушений. В начале 60-х годов так считали многие новозеландские сейсмологи и с ними соглашались некоторые их японские коллеги. В течение нескольких десятилетий сейсмологи Европы и Америки занимались проблемами, к которым механизм землетрясений не имел никакого отношения или фигурировал как побочный вопрос; видимо, рассмотрение серьёзных физических возражений против этой теории было упущено из виду» (Эйби, 1982, с. 101).

Следует отметить, что вышеизложенные соображения Дж.А. Эйби о том, что наблюденные деформации на поверхности земли «мало что говорит нам об условиях в очаге» не соответствует действительности.

Дело в том, что очаги коровых землетрясений располагаются в верхнем, так называемом, сейсмогенном слое земной коры, мощность которого не превышает 15-20 км. Земная поверхность является верхней границей этого слоя а, следовательно, и верхней границей очагов, готовящихся в этом слое сильных землетрясений, и поэтому она участвует в происходящих в очаге деформационных процессах. Эти соображения находят полное подтверждение в геодезических и сейсмологических экспериментальных данных (рис. 1, 2, 3).

Возможности геодезического мониторинга в осуществлении точного прогноза места и максимально возможной силы готовящегося землетрясения

На рис. 1 представлены данные повторных триангуляций, выполненных в эпицентральных зонах после случившихся сильных землетрясений.

Вертикальные линии – сейсмогенные разломы, по которым произошли горизонтальные подвижки при землетрясениях. Зафиксированные смещения пунктов триангуляции показаны точками; масштаб смещений показан на вертикальной оси. На горизонтальной оси отложено расстояние этих пунктов от разлома.

На всех пяти графиках прослеживается одна и та же закономерность – смещения максимальны вблизи разлома и очень быстро (экспоненциально) убывают с удалением от него. Причина появления указан-

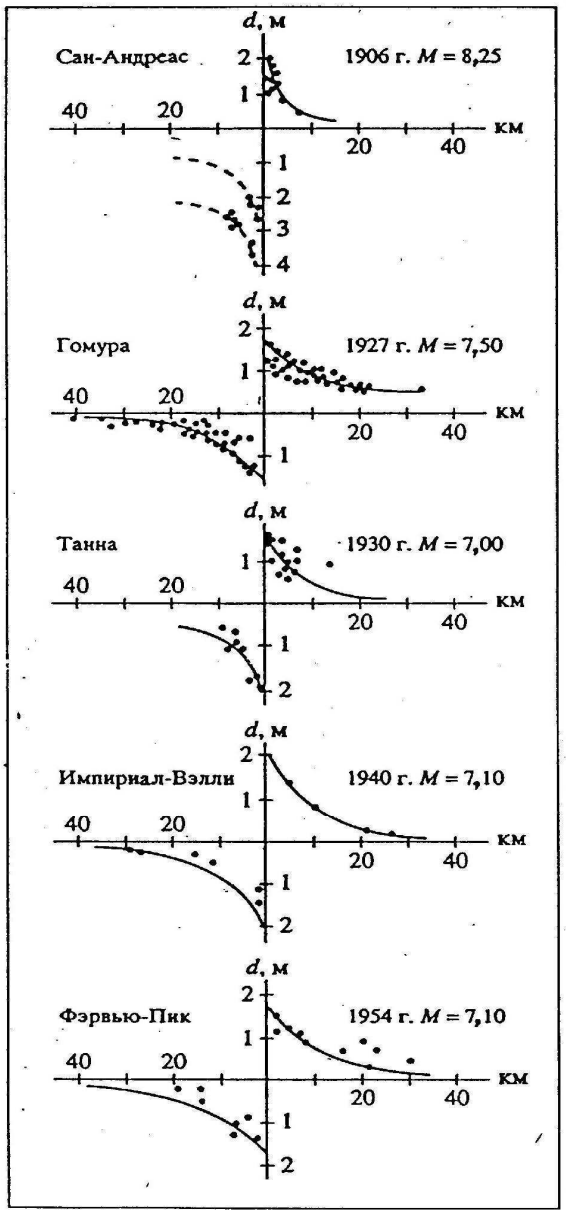

Рис. 1. Реальное распределение смещений пунктов триангуляции (d) в зонах сейсмогенных разломов при сильных коровых землетрясениях в зависимости от удаления геодезических пунктов от разломов

ной закономерности смещений пунктов триангуляции демонстрируется рис. 2.

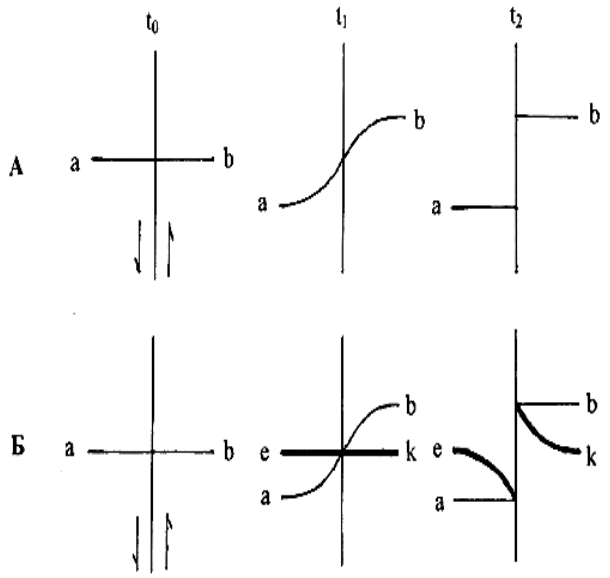

Рис. 2. Объяснение явления экспоненциального распределения смещений геодезических пунктов в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений: А – участок сейсмогенного разлома в моменты времени t_0, t_1, t_2; Б – то же, что и А, но добавлен геодезический профиль ek

На рис. 2А показан один и то же участок сейсмогенного разлома (вертикальная линия) в три момента: t_0, t_1 и t_2, соответствующих различным напряженным состояниям горных пород. Направление тектонических смещений на разломе показаны стрелками. Момент t_0 – в горных породах отсутствуют сейсмогенные напряжения, что показано прямой ab. Момент t_1 – горные породы предельно упруго напряжены: кривая ab. Момент t_2 – положение горных пород после землетрясения; сейсмогенные напряжения сняты, горные породы распрямились в два прямолинейных отрезка.

Рис. 2Б отличается от рис. 2А лишь тем, что в момент t_1 добавлена прямая ek, представляющая собой прямолинейное геодезическое построение (геодезический профиль).

С рассматриваемых нами позиций наибольший интерес представляет положение и форма нарисованной нами прямой ek (геодезический профиль) в момент t_2. Как видно из рисунка они совершенно соответствуют экспериментальным кривым рис. 1, что однозначно подтверждает наши соображения о возможности отслеживать на земной поверхности процесс накопления сейсмогенных деформаций в готовящемся очаге сильного корового землетрясения.

Кроме того, данные рис. 1 говорят о том, что в приведенных на этом рисунке случаях исходные триангуляционные измерения были выполнены над уже готовящимися очагами землетрясений, то есть в них уже были накоплены сейсмогенные напряжения. Если бы это было не так, то первоначально прямолинейный геодезический профиль при землетрясении был бы лишь разорван на линии разлома, но не испытал никаких искривлений, а представлял бы собой два прямолинейных отрезка, аналогичных поведению горных пород в момент t_2.

Таким образом, имеющиеся данные повторных геодезических измерений в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений убедительно свидетельствуют в пользу того, что процесс подготовки очага корового землетрясения затрагивает и земную поверхность. Как уже отмечалось выше в этом нет ничего удивительного, так как она является верхней границей сейсмогенного слоя земной коры – самого верхнего слоя земной коры мощностью 10-25 км.

Рис. 3 подтверждает участие поверхности земли в процессе подготовки очага землетрясения. Из рисунка однозначно следует, что после землетрясения упругие напряжения снимались, а, следовательно, до землетрясения накапливались лишь в самой верхней части земной коры и что наиболее однородное поле афтершоков занимает интервал глубин непосредственно от земной поверхности до десяти километров.

Эти экспериментальные данные являются наглядным и убедительным подтверждением того, что процесс накопления сейсмогенных деформаций распространяется и на земную поверхность.

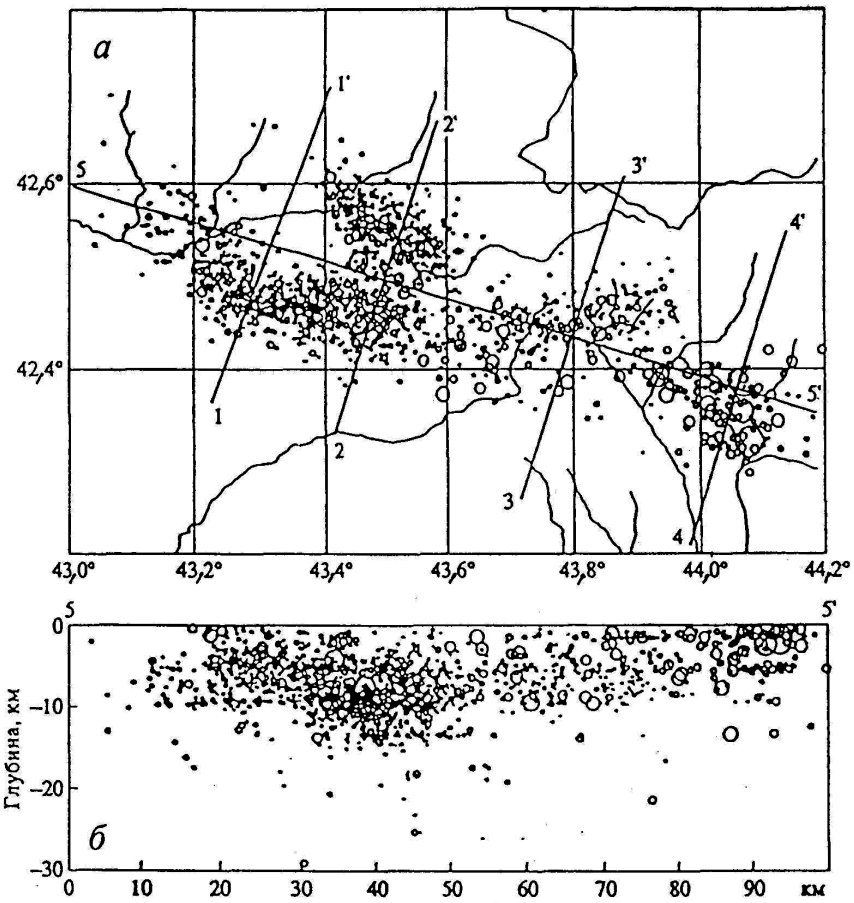

Рис. 3. Карта эпицентров Рачинского землетрясения (а) и вертикальный разрез по линии 5-5`(б) (Арефьев и др., 1993): на секущую плоскость спроецированы все сейсмические события за афтершоковый период; глубина основного толчка 10 км

Итак, имеющиеся экспериментальные данные (геодезические и сейсмологические) с полной определенностью свидетельствуют о несостоятельности попыток «новозеландских, некоторых японских» и других сейсмологов найти альтернативу «Теории упругой отдачи» («Возможно, что бóльшая часть энергии высвобождается не от разрядки упругих напряжений, а от чего-то другого… рассмотрение серьёзных физических возражений против этой теории было упущено из виду», Эйби, 1982, с. 101).

Есть все основания считать, что время решило спор в пользу «Теории упругой отдачи», согласно которой землетрясение является актом разрядки накопленных упругих напряжений в локальном объеме земной коры, а не «от чего-то другого». К сожалению, попытки найти «что-то другое» предпринимаются и в настоящее время, что, конечно же, способствует живучести мифа о невозможности решения проблемы практически значимого прогноза землетрясений.

Следует отметить, что вышеизложенное ярко иллюстрирует то, как можно неудачно поставленным экспериментом опорочить прекрасную идею и тем самым способствовать выбору ложного пути для решения животрепещущей проблемы. Формальный подход американских геодезистов к анализу геодезических измерений сыграл роковую роль в решении проблемы. Это еще один наглядный пример трудностей пути познания.

Итак, можно полагать, что осуществляемая в настоящее время методология решения проблемы прогноза землетрясений принципиально непригодна для этих целей. Именно поэтому осуществить проблему прогноза землетрясений методами решения обратных задач не представляется возможным, что и подтверждается длительными, и в некоторые периоды очень интенсивными (СССР, США – Паркфилд, Япония), комплексными исследованиями, осуществляемыми по указанной ме-

тодологии.

Означает ли это тупик в решении рассматриваемой проблемы? Отнюдь нет, так как осуществление прогнозов места очага сильного корового землетрясения и его максимальной силы возможно решением прямых задач, благодаря открытию действительного вида деформационного признака подготовки очага землетрясения.

Выполненными исследованиями было установлено, что искомым признаком подготовки очага землетрясения является накапливаемый во времени по экспоненциальному закону и, следовательно, закономерный упругий изгиб горных пород в этом очаге (Певнев, 1988).

Причины зарождения, созревания и разрушения очагов коровых землетрясений в тех или иных участках разломов обуславливаются или полным прекращением или существенным уменьшением тектонических смещений на этих участках. Г.А. Гамбурцев такие участки назвал «спайками»; чем длиннее такая «спайка», тем больше сейсмической энергии она способна накопить (Гамбурцев, 1982).

Что касается закона распределение упругих смещений горных пород в очаге землетрясения, то оно определяется следующим уравнением:

$$d=De^{ax}, \qquad (1)$$

где d – величина упругого смещения рассматриваемой точки земной поверхности; x – удаление этой точки от разлома; D – максимальное упругое смещение на разломе ($x=0$); α – параметр, характеризующий упругие свойства горных пород в очаге (Магницкий, 1965).

Выше было показано, что при подготовке сильных коровых землетрясений регулярное изгибание испытывает и земная поверхность над очагом, являющаяся его верхней границей. Именно участие земной поверхности в процессе подготовки очага и открывает реальные возможности для обнаружения и отслеживания искомого прямого признака. Отслеживать процесс накопления сейсмогенных деформаций в очаге можно лишь с помощью геодезического метода, который обладает всеми необходимыми для этого разрешениями (Певнев, 2003; 2007).

Этим методом можно определять точное местонахождение и размеры зреющего очага землетрясения (его длину и ширину), то есть осуществлять два первых из трех прогнозов проблемы (где и какой силы), необходимых и достаточных для ее решения: прогноз места и прогноз максимально возможной силы будущего землетрясения.

Поясним сказанное с помощью рис. 4 и таблицы.

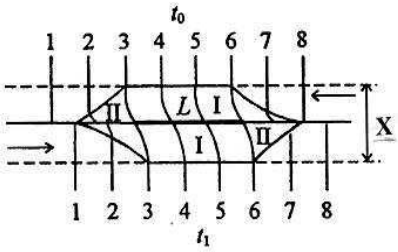

Рис. 4. Модель упругого деформирования земной поверхности над очагом готовящегося землетрясения (в момент t_1):
линии (1-1,...8-8) – геодезические профили, которые в момент зарождения очага (t_0) представляли собой сплошные прямые линии, в процессе подготовки очага были либо разорваны и смещены по разлому (1-1 и 8-8), либо и деформированы, и смещены (2-2 и 7-7), либо упруго деформированы над очагом (3-3,…6-6); I – зона сжатия; II – зона растяжения; L – линия прекращения смещений по разлому (спайка); X – ширина очага землетрясения

На рис. 4 показаны смещения и деформации прямолинейных геодезических прогнозных профилей в момент t_1, созданных в момент t_0 над очагом готовящегося землетрясения. Согласно этому рисунку длину очага L можно определить по виду деформируемых профилей; она соответствует расстоянию между полностью упруго деформируемыми частями профилей, оказавшихся в зоне действия очага. В нашем случае это профили 3-6. В концевых зонах очага профили испытывают и упругие деформации, и смещения (профили 2 и 7). За пределами очага профили испытывают лишь тектонические смещения (профили 1 и 8).

Таблица. Зависимость силы землетрясения (магнитуды M) от длины очага (L) и подвижки в очаге (D)

M	L, км	D, см
3	1,1	0,11
4	3,0	0,62
5	8,3	3,5
6	23	20
7	62	120
8	170	660
9	470	3800

Таким образом, рис. 4 представляет собой принципиальную схему возможностей геодезического мониторинга для точного прогноза местоположения готовящегося очага землетрясения и его размеров. Связи между размерами очага (его длиной L), силой землетрясения (его магнитудой M) и происходящей при землетрясении подвижкой в очаге (D), численно равной максимальному упругому смещению, накопленному в очаге к моменту землетрясения, приведены в таблице.

Следовательно, если с помощью геодезического мониторинга определить длину готовящегося очага землетрясения, то данные таблицы позволят установить какой магнитуде соответствует измеренная длина очага и таким образом определить землетрясение какой максимальной силы он может породить.

Итак, приведенная схема геодезического мониторинга позволяет осуществлять два прогноза – точный прогноз места готовящегося очага землетрясения и прогноз максимальной силы, которую способен породить исследуемый очаг.

О прогнозе времени землетрясения

Что касается прогноза времени землетрясения, то в отличие от прогнозов места и силы, которые можно осуществлять по указанным закономерностям, главным препятствием на пути его осуществления является незнание реальных закономерностей процессов разрушения очагов. А так как в настоящее время среди методов прогноза нет ни одного, способного достоверно определить эти закономерности, то единственно правильным решением поиска таких закономерностей является широкое комплексирование методов, то есть. создание специальных комплексных прогнозных систем.

Из смысла решаемой задачи следует, что такие комплексные системы должны иметь разрешения, достаточные для отслеживания в различных полях, тонкой структуры процесса разрушения горных пород в сейсмогенном слое земной коры.

В этой связи следует особо подчеркнуть значение заблаговременных осуществлений прогнозов места и силы готовящегося очага землетрясения для положительного решения прогноза времени его реализации. Только в этом случае открывается возможность проводить комплексные исследования не в случайно или недостаточно обоснованно выбранных местах, а непосредственно над реально существующим очагом готовящегося землетрясения, что позволит осуществлять регистрацию даже очень слабых и быстро затухающих с удалением от их источника аномалий, порождаемых этим очагом. В этом случае, еще даже и до установления законов разрушения очагов, можно рассчитывать на то, что коллективное поведение аномалий в различных полях явится достаточно объективным показателем приближающейся катастрофы и позволит своевременно принять необходимые меры безопасности.

Заблаговременное обнаружение готовящихся очагов землетрясений позволит создавать компактные комплексные системы наблюдений с разрешением достаточным для изучения тонкой структуры развития процессов разрушения в этих очагах, то есть для определения закономерностей протекания этих процессов. Таким видится прямой путь к прогнозу времени землетрясений**.**

Таким образом, в настоящее время появились реальные возможности для разработки последовательной, научно-обоснованной стратегии точного, практически значимого прогноза землетрясений методом решения прямой задачи.

Заключение

Современное кризисное состояние в решении проблемы прогноза землетрясений обусловлено объективными причинами – используемые для ее решения обратные задачи являются некорректными, не позволяющими осуществлять точный прогноз местоположения готовящегося очага землетрясения.

Ошибочному выбору стратегии аномалий способствовали два обстоятельства: неудачная попытка американских геодезистов решать проблему прогноза землетрясений методом прямых задач, приведшая к его дискредитации, а также скудные в те времена знания о строении и свойствах реальной геолого-геофизической среды.

Возможно ли в настоящее время решение проблемы практически значимого прогноза землетрясений? Да. Для этого надо использовать те преимущества геодезического метода, благодаря которым осуществляется прогнозирование места готовящегося очага землетрясения и его максимальной силы методами решения прямых задач.

Получить ответы на все три главных вопроса – где, какой силы и когда, можно только при разумном сочетании в решении проблемы прогноза землетрясений методов прямых и обратных задач.

После того как прямыми методами будет обнаружен готовящийся очаг землетрясения (прогноз места) и определены его размеры (прогноз силы) на нем нужно будет создавать систему комплексных очаговых наблюдений, рассчитанную в первую очередь на установление закономерностей проявления деформационных и других процессов на разных стадиях его разрушения. Это и позволит приблизить решение проблемы прогноза времени землетрясений.

Прогресс в решении проблемы прогноза землетрясений будет возможен лишь в том случае, если наряду со сбором различных аномалий будут начаты исследования, нацеленные на обнаружение прямых предвестников, прямых указателей того, что в данном конкретном объеме горных пород идет процесс накопления упругих сейсмогенных деформаций. Решить эту задачу можно с помощью специального геодезического мониторинга.

Литература

Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э., Борисов Б.А. и др. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1993. N3. С.12-23.

Горшков Г.П. Александр Петрович Орлов (из истории русской сейсмологии). М.: Изд-во АН СССР, 1955. 62 с.

Гамбурцев Г.А. Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие методов прогноза землетрясений» // Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике: М.: Наука, 1982. С. 304-311.

Кейлис-Борок В.И. До аплодисментов еще далеко // Известия. № 307. 2 нояб.1989 г.

Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.

Мушкетов И.В. Верненское землетрясение 28 мая (9 июня) 1887 г. // Тр. Геологического Комитета. 1890. Том X. N 1. 154 с.

Мушкетов И.В. Мат. по Ахалкалакскому землетрясению 19 дек. 1899 г. // Тр. Геологического Комитета. Новая серия. Вып. 1. С-Петербург: Геолкома, 1903. 80 с.

Научное наследие Г.А. Гамбурцева и современная геофизика. М.: ОИФЗ РАН, 2003. 380 с.

Орлов А.П. Землетрясения и их соотношения с другими явлениями природы: заметки по поводу землетрясений 1887. Казань, 1887. 170 с.

Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС, 2003. 153 с.

Певнев А.К. Прогноз землетрясений – геодезические аспекты проблемы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. N 12. С. 88-98.

Певнев А.К. Что мешает решить проблему прогноза землетрясений // Землеустройство. 2007. № 11. С. 63-70.

Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иност. лит-ра, 1963. 670 с.

Эйби Дж.А. Землетрясения. М.: Недра, 1982. 264 с.

Reid H.F. Some Lesson of the California Earthquake and the Prediction of Earthquakes. C. R. Assoc. Internat. Seismol. Zermat. 1909. P. 5.