

А.К. Певнев

О ПУТИ К РЕАЛЬНОМУ ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.К. Pevnev

ON THE ROAD TO REAL EARTHQUAKE FORECASTS

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.

Ключевые слова: прогноз землетрясений, корректные и некорректные обратные задачи, прямые задачи, упругий изгиб, напряжение, сейсмогенная деформация, афтершок, геодезический мониторинг.

The inadequacy of the earthquake forecasting strategy is shown as based on attempts to solve the problem solely using the methods of inverse problems, which have proven to be incorrect despite their potential. A solution of the problem is shown to be possible by the methods of direct problems due to the fact that the Earth's surface participates in the process of the earthquake centre preparation and consequently, this process is to be tracked via special geodetic monitoring directly from the terrestrial surface.

Key words: forecast of earthquakes, correct and incorrect inverse problems, direct problems, elastic bend, stress, seismogenetic deformation, aftershock, geodetic monitoring.

*Науки, которые не родились из эксперимента, этой основой всех познаний, бесполезны и полны заблуждений.
Леонардо да Винчи*

Почти всегда в научной геодезии имеют дело с установлением очень малых величин, которые, однако, свидетельствуют о мощных грандиозных процессах в жизни Земли.

Феодосий Николаевич Красовский

О причинах кризиса в проблеме прогноза землетрясений

Предсказание землетрясений, можно без преувеличения сказать, является древнейшей мечтой Человечества и остается, к сожалению, таковой и в наше

время. Чего только не придумали люди по поводу причин возникновения землетрясений. В числе первых объяснений можно найти такие, как шевеления различных, держащих на своих плечах Землю, подземных чудовищ; козни царя тьмы; господнее наказание грешников и пр. и пр. Поиски истинной причины землетрясений оказались очень долгими – научно обоснованные представления о природе сейсмичности появились лишь во второй половине XIX века. Вот что по этому поводу можно прочесть в книге выдающегося русского геолога и сейсмолога России XIX века Ивана Васильевича Мушкетова “Физическая геология”:

“Мнения о причинах землетрясений не только многочисленны и разнообразны, но часто диаметрально противоположны. Такое разногласие во взглядах, нередко исключавших друг друга и подрывавших обоюдное доверие, обуславливалось главным образом недостатком надлежащих методов исследования и особенно систематических наблюдений. Только в последние годы (лет 20–30 тому назад), благодаря, с одной стороны, разработке методов, а с другой – учреждению постоянных сейсмических станций, вопрос о причине землетрясений если не разрешён ещё окончательно, то во всяком случае продвинулся настолько вперёд, что уже большинство новейших исследователей приходит к благотворному соглашению по крайней мере относительно главных пунктов, т.е. во-первых, основная причина крупных землетрясений кроется в тектонических процессах, преимущественно в дизъюнктивной дислокации, которая и обуславливает географическое распределение сейсмических областей; во вторых, эта основная и общая причина не исключает другие частные причины, которые, хотя производят местные, обыкновенно слабые и непродолжительные сотрясения, но не имеют общего значения и большею частью являются, так сказать, побочными факторами, способствующими или противодействующими главной основной причине сейсмических явлений” [Мушкетов, 1899, с. 699].

Под “частными причинами, производящими слабые и непродолжительные сотрясения”, И.В. Мушкетов понимал обвальные и вулканические землетрясения.

Установление истинной причины сейсмичности позволило в XX веке предпринять первую научно обоснованную атаку на решение этой проблемы. На это решение были затрачены колоссальные интеллектуальные и финансовые ресурсы, благодаря чему были накоплены бесценные знания о сейсмическом режиме Земли, но, к сожалению, решить проблему практически значимого прогноза землетрясений пока не удалось. Основной причиной неудачи является то, что реализуемая методика прогноза не может обеспечить точное определение местоположение готовящегося очага землетрясения, без чего практически значимый прогноз осуществить невозможно. Вот что по этому поводу можно прочесть у двух замечательных российских ученых. Первый российский сейсмолог Александр Петрович Орлов еще в позапрошлом веке написал следующее: 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].

Известный советский геолог Георгий Петрович Горшков, написавший книгу об Александре Петровиче Орлове, свое представление о значении прогноза места изложил более решительно. «Можно еще 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].

Действительно, кому нужны такие прогнозы. Если Землю ежегодно сотрясают примерно 20 сильных и сильнейших сейсмических ударов ($M \geq 7$), то почти безошибочно “предсказать”, что в том или ином месяце произойдет сильное землетрясение, труда не представляет. Если не иметь в виду психически ненормальных людей, т.е. людей с неадекватным восприятием окружающего нас реального Мира, то остальных предсказателей, дающих прогнозы землетрясений без их места, в первом приближении можно разделить на две категории – истинно заблуждающихся и людей, которых сейчас принято называть пиарщиками.

В чем же причина того, что современная стратегия не может обеспечить точный прогноз места очага готовящегося землетрясения?

Доказательства этого утверждения подробно изложены в статье, опубликованной в 2009 г. в «Ученых записках РГГМУ» № 9 [Певнев, 2009] и поэтому здесь изложены в сокращенном виде.

Существующая стратегия реализации прогноза землетрясений зиждется на идеях обнаружения очага и отслеживания происходящих в нем процессов не прямыми методами, а с помощью решения обратных задач по разрозненным косвенным признакам – аномалиям, порождаемым готовящимся очагом в различных полях: сейсмических, деформационных, гидрогеологических, геохимических, электромагнитных и др. При этом также предполагается, что каким-то образом среди фиксируемых аномалий можно будет выделять лишь порождаемые исследуемым очагом. 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, что позволяет говорить о том, что представления о корректности указанных обратных задач были ошибочными – совершенно очевидно, что задачи изначально являются некорректно поставленными.

Долгое время причину «неуспеха» стратегии аномалий связывали с дефектами наблюдательных систем – их разреженностью. Полагали, что стратегия аномалий заработает, если прогнозная система будет существенно сгущена. Представление о том, что исключить влияние указанных причин, т.е. некор-

ректную задачу перевести в разряд корректно поставленных задач, можно существенным сгущением пунктов наблюдений, является заблуждением. Это наглядно продемонстрировало непредсказанное Калифорнийское землетрясение 1989 г., которое произошло в середине самой густой в мире наблюдательной сети.

Вот что о возможностях “количественного” решения проблемы прогноза землетрясений было написано академиком В.И. Кейлисом-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, Калифорнийское землетрясение явилось заключительным аккордом в определении реальных возможностей «стратегии аномалий» – **оно со всей очевидностью показало полную бесперспективность ее использования.**

Можно говорить о двух главных причинах, приводящих к некорректности обратных задач: первая – строение и состояние реальной среды сейсмогенного слоя земной коры (ее верхние 10–25 км); вторая – отсутствие надежных фильтров, позволяющих производить выборку аномалий, порождаемых только лишь исследуемым очагом.

Что касается первой причины, то есть все основания считать, что некорректность задач обусловлена такими характеристиками реальной среды, как неоднородность, анизотропность, отсутствие ее сплошности (кусковатость среды), наличие протяженных зон с ослабленными механическими свойствами горных пород (разломы), флюидонасыщенность и многое другое, что не позволяет определить точное местоположение готовящегося очага землетрясения.

И о второй причине. 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. Совершенно очевидно, что отсутствие таких фильтров делает обратные задачи абсолютно некорректными.

Следует отметить, что теоретической основой выбора стратегии аномалий явилась, а для многих ученых существующая и по сей день, твердая уверенность в отсутствии прямых методов изучения процессов, происходящих в готовящемся очаге землетрясения. В подтверждение сказанному приведем сообра-

жения председателя Международной комиссии МАСФНЗ по поискам предвестников землетрясений чл.-корр. АН СССР Е.Ф. Саваренского:

«Проблема создания надёжных методов предсказания землетрясений ещё не решена и исключительно трудна вследствие невозможности непосредственного изучения внутриземных процессов, порождающих землетрясения. Эти процессы протекают медленно и маскируются многими быстрыми явлениями» [Поиски предвестников землетрясений, 1976, с. 7].

А вот как по поводу стратегии решения проблемы прогноза землетрясений, принятой после смерти директора Геофизического института АН СССР академика Г.А. Гамбурцева, высказался известный сейсмолог О.К. Кондратьев:

«... начатые работы по прямому изучению разломов земной коры (по терминологии Г.А. Гамбурцева – сейсмических швов) были свернуты. В 1971 г. в Институте физики Земли утверждается “Программа работ по поискам предвестников землетрясений”, и в 1980 г. новая “Научная программа исследований по прогнозу землетрясений”. Эти документы на несколько десятилетий утвердили примат поиска разрозненных сопутствующих явлений, более того, в них была заложена мысль, что наиболее быстрый успех может быть получен при изучении именно косвенных факторов...

Разрушительное Спитакское землетрясение 1988 г. инициировало попытку проанализировать состояние дел с краткосрочным прогнозом и породило определенные сомнения в эффективности ретроспективного анализа разнородных параметров в качестве предвестников землетрясений» [Кондратьев, 1995, с. 23].

Как известно, самым главным критерием оценки различных гипотез является их экспериментальная проверка. Стратегия «аномалий» такой проверки не выдержала, и ее сторонникам следует это признать и пытаться искать новые пути решения проблемы прогноза землетрясений.

Деформационная модель очага корового землетрясения

Итак, в настоящее время препятствием на пути решения проблемы прогноза землетрясений является невозможность осуществления прогноза места методами решения обратных задач. 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**. Эти прогнозы можно осуществлять с помощью деформационно-геодезического метода, предложенного около 20 лет тому назад [Певнев, 1988].

Рассмотрение вопроса о возможностях геодезического метода в осуществлении точного прогноза места готовящегося очага землетрясения и его максимально возможной силы начнем с анализа экспериментальных данных, представленных на рис. 1.

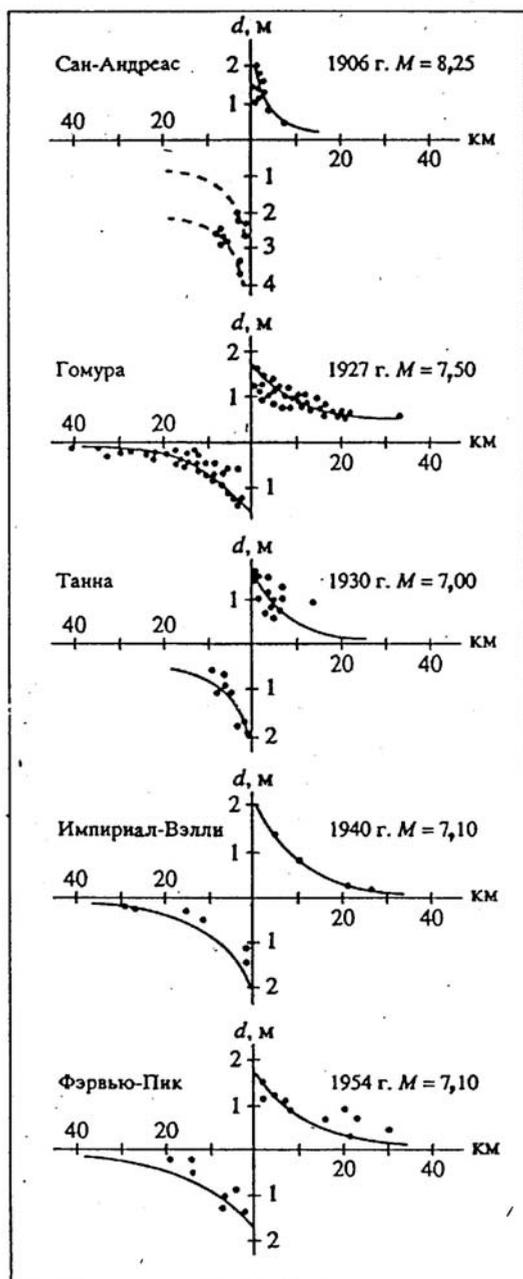


Рис. 1. Реальное распределение смещений пунктов триангуляции (d) в зонах сейсмогенных разломов при сильных коровых землетрясениях в зависимости от удаления геодезических пунктов от разломов

На этом рисунке 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 отложены 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 указанной закономерности смещений пунктов триангуляции демонстрируется рис. 2, но расшифровку этого рисунка предварим следующим комментарием.

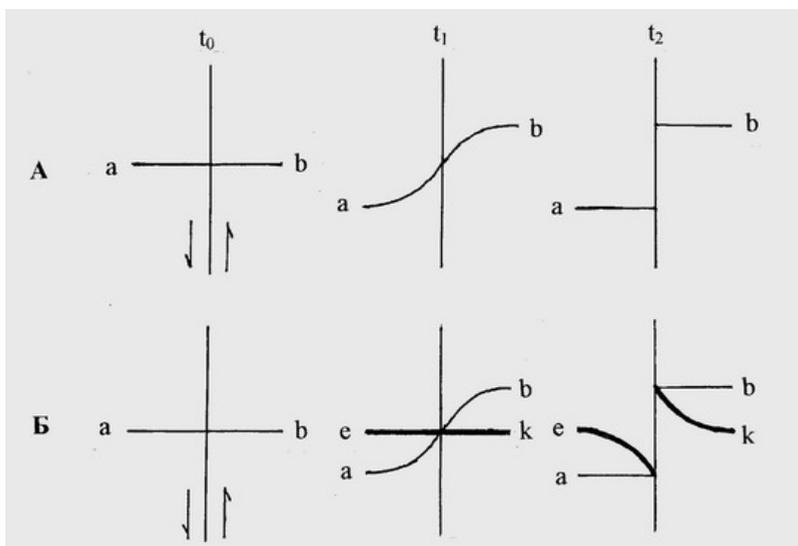


Рис. 2. Объяснение явления экспоненциального распределения смещений геодезических пунктов в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений

В свете современных представлений наиболее вероятной причиной формирования очагов коровых землетрясений (накопления сейсмогенных деформаций в локальных объемах горных пород) является изменение скорости тектонических движений в том или ином конкретном участке сейсмогенного разлома.

Предполагается, что указанные изменения скоростей смещений в разломах могут происходить из-за различных физико-химических и механических процессов [Гамбурцев, 1960; Ризниченко, 1985]. Полное или частичное прекращение смещений в какой-либо части сейсмогенного разлома равнозначно рождению концентратора напряжений и поэтому приведет к возникновению в этом месте локального поля упругих напряжений. Г.А. Гамбурцев такие концентраторы напряжений назвал «спайками» [Развитие идей Г.А. Гамбурцева..., 1982, с. 306]. Для определения вида и размеров этого поля можно воспользоваться

широко применяемым в решении задач теории упругости принципом локальности эффекта самоуравновешенных внешних нагрузок, принципом Сен-Венана. Для нашего случая наиболее подходящей является следующая формулировка этого принципа: "Если в какой-либо малой части тела приложена уравновешенная система сил, то она вызывает в теле напряжения, очень быстро убывающие по мере удаления от этой части (экспоненциальный характер затухания напряжений [Безухов, 1974, с. 6].

Итак, если размеры возникающего концентратора напряжений малы в сравнении с размерами сейсмогенной зоны, то, согласно принципу Сен-Венана, порожденное этим концентратором **местное поле упругих напряжений будет закономерно изменяющимся полем, обеспечивающим упругую изгибную деформацию (упругий изгиб) горных пород в готовящемся очаге землетрясения.** Максимальное упругое смещение будут иметь горные породы, примыкающие к остановившемуся участку разлома, а по мере удаления в обе стороны от этого участка упругие смещения горных пород будут быстро и закономерно убывать (рис. 1).

В силу изложенного на рис. 2Б в качестве источника напряжений взята, как наиболее физически обоснованная, деформация упругого изгиба.

На рис. 2А показан один и тот 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 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 , т.е. в момент, когда в очаге уже были накоплены сейсмогенные деформации (кривая ab), добавлена прямая ek , представляющая собой прямолинейное геодезическое построение (геодезический профиль).

С рассматриваемых нами позиций наибольший интерес представляет положение и форма геодезического профиля (прямая ek в момент t_2). Как видно из рисунка, этот прямолинейный профиль, созданный на уже напряженных горных породах (кривая ab в момент t_1), после снятия землетрясением упругих сейсмогенных деформаций (момент t_2) не только претерпел разрыв, но и изменил свою форму – он превратился в два отрезка кривых совершенно аналогичных экспериментальным кривым рис. 1. Столь поразительное подобие теоретических и экспериментальных кривых доказательно свидетельствует о подобии деформационной модели реальному процессу подготовки очага землетрясения. Поэтому есть все основания говорить о том, что в приведенных на рис. 1 случаях исходные триангуляционные измерения были выполнены над уже готовящимися очагами землетрясений, т.е. 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. В этом случае смещения геодезических пунктов при землетрясении аналогичны поведению горных пород. Это можно видеть на рис. 2 (позиции $A t_2$ и $B t_2$) и на рис. 4 (позиции $t_1 3$ и $t_2 3$).

Из этого следует вывод о том, что, если повторные триангуляционные измерения в эпицентральных зонах случившихся землетрясений выявят лишь одинаковые скачки смещений всех пунктов, расположенных по разные стороны от разлома, и эти смещения могут быть аппроксимированы прямыми линиями, то это однозначно укажет на то, что исходная триангуляция была создана еще до начала формирования очага землетрясения.

Таким образом, имеющиеся данные повторных геодезических измерений (рис. 1 и 4) в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений убедительно свидетельствуют в пользу того, что в процессе подготовки очага корового землетрясения участвует и земная поверхность, благодаря чему и появляется возможность использования прямого метода для обнаружения местоположения готовящегося очага землетрясения, определения его размеров и отслеживания происходящих в нем деформационных процессов. В этом нет ничего удивительного, так как она является верхней границей сейсмогенного слоя земной коры – самого верхнего слоя земной коры мощностью 10–25 км, в котором зарождаются, созревают и разрушаются очаги коровых землетрясений.

Участие земной поверхности в процессе подготовки очага корового землетрясения подтверждают и сейсмологические данные (рис. 3).

На секущую плоскость спроецированы все сейсмические события за афтершоковый период. Глубина основного толчка 10 км. Афтершоковый период – временной отрезок после основного толчка, в течение которого происходит сброс до фоновых значений накопленных в очаге упругих напряжений.

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.

Что касается прямого признака подготовки очага землетрясения, то имеющиеся экспериментальные данные и теоретические соображения убедительно говорят о том, что этим искомым признаком является закономерный упругий изгиб горных пород в очаге готовящегося землетрясения.

Рассмотрим более детально картину смещений и деформаций земной коры при подготовке и реализации землетрясения. Сделаем это с помощью рис. 4, на котором изображены три участка (1, 2, 3) сейсмогенного разлома. Линии a_1 a_2 и

$b_1 b_2$ – геодезические профили, представляющие собой прямые линии при выполнении на них исходных измерений соответственно в моменты t_0 и t_1 ; X – ширина зоны накопления сейсмогенных деформаций (ширина очаговой зоны). Профиль $a_1 a_2$ создан на еще не напряженном основании (момент t_0), а профиль $b_1 b_2$ – на уже напряженном основании (момент t_1). Постулируется, что скорость взаимных смещений литосферных блоков за пределами очаговой зоны постоянна и одинакова на всех трех участках.

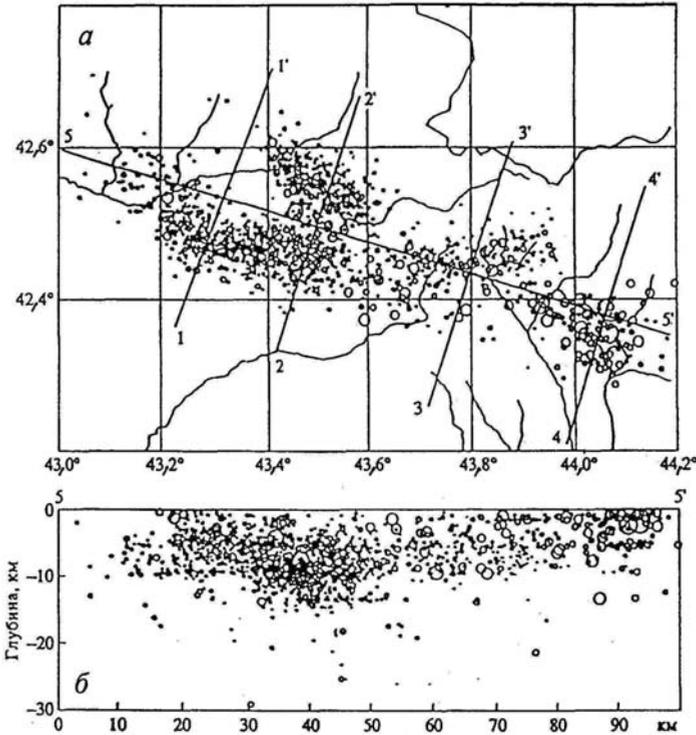


Рис. 3. Карта эпицентров Рачинского землетрясения (а) и вертикальный разрез по линии 5-5'(б) [Арефьев, 1993]

На секущую плоскость спроецированы все сейсмические события за афтершоковый период. Глубина основного толчка 10 км. Афтершоковый период – временной отрезок после основного толчка, в течение которого происходит сброс до фоновых значений накопленных в очаге упругих напряжений.

На участке 1 происходит взаимное смещение блоков по разлому без накопления упругих деформаций (крип). На участке 2 тектонические смещения по разлому прекратились сразу после момента t_0 и началось накопление сейсмогенных деформаций. На участке 3 показано положение геодезических профилей при полном сбросе в моменты t_1 и t_2 упругих деформаций, накопленных с момента t_0 .

Как уже отмечалось ранее, картина смещений и деформаций в очаге после снятия упругих напряжений представляется довольно парадоксальной: прямая b_1b_2 и кривая a_1a_2 позиции t_13 , претерпев разрыв, обменялись формами; кривая превратилась в два прямолинейных отрезка, а прямая – в две кривые. Но это, конечно же, парадоксально лишь на первый взгляд. Кажущаяся необычность деформаций рассматриваемых линий обусловлена тем, что геодезические профили a_1a_2 и b_1b_2 представляли собой прямые линии не только в разные моменты времени (t_0 и t_1), но и, что самое главное, при разных исходных состояниях горных пород.

Профиль a_1a_2 был создан на еще ненапряженных горных породах (момент t_0), в то время как профиль b_1b_2 был создан в момент t_1 на уже напряженных горных породах. На рис. 4 (позиция t_12) это показано искривлением профиля a_1a_2 .

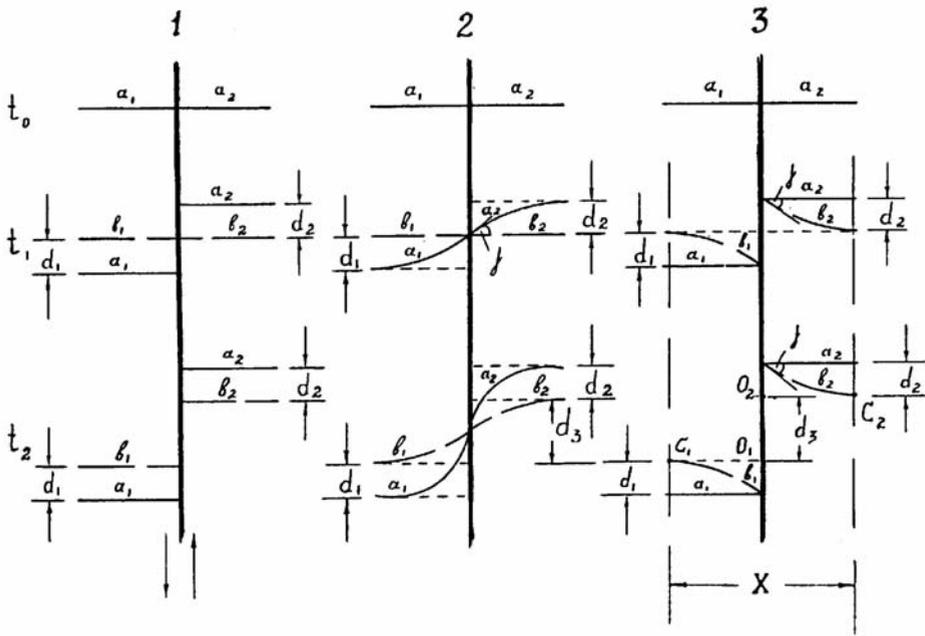


Рис. 4. Модели смещений и деформаций земной коры в сейсмогенной зоне

В результате землетрясения (разрыв горных пород с их смещением по разлому и снятием накопленных упругих деформаций) кривая a_1a_2 (t_12) разорвется, обе ее половинки распрямятся в два прямых отрезка (t_13). Что касается прямой b_1b_2 (t_12), то испытав разрыв при землетрясении, обе ее половинки окажутся изогнутыми из-за того, что прямая b_1b_2 (геодезический профиль) была создана на предварительно напряженном основании.

По рис. 4 легко догадаться, что кривые b_1 и b_2 (позиция t_13) являются зеркальным отображением кривой a_1a_2 (позиция t_12) и, следовательно, содержат ту

же информацию, что и кривая a_1a_2 в момент t_1 . А так как эта кривая в момент t_1 является ничем иным, как полной суммой сейсмогенных деформаций, накопленных горными породами к этому моменту, то отсюда однозначно следует, что в кривых b_1 и b_2 , полученных по геодезическим данным, зафиксировано напряженное состояние горных пород на момент t_1 , т.е. они "помнят" действительную картину поля накопленных упругих деформаций с момента t_0 до момента t_1 .

Сравнение позиций t_1 и t_2 показывает, что форма кривых b_1 и b_2 не зависит от длительности промежутка $(t_2 - t_1)$, т.е. она остается постоянной во времени. Из этого следует одно очень важное обстоятельство – такие "геодезические кривые" могут быть определены из повторных измерений, выполняемых как сразу после землетрясения, так и несколько позже.

Детальный анализ геодезических кривых, их взаимного расположения и расположения относительно породившего их разлома убеждает в том, что по результатам геодезических измерений, выполненных в очаговой зоне в промежутке между t_0 и t_2 , а также после t_2 (землетрясения), можно получить следующую информацию.

1. Максимальную сумму накопленных к моменту t_1 (момент выполнения исходных геодезических измерений) упругих сейсмогенных смещений $(d_1 + d_2)$, где d_1 – максимальное упругое смещение, накопленное между t_0 и t_1 левым блоком (на рис. 4), а d_2 – то же самое для правого блока.

2. Максимальную сумму накопленных в очаге сейсмогенных смещений $(d_1 + d_2 + d_3)$, где d_3 – максимальное упругое смещение горных пород, накопленное между моментами t_1 и t_2 (землетрясение).

3. Ширину очаговой зоны X ($C_1O_1 + O_2C_2$) – горизонтальный размер очага в перпендикулярном разлому направлении. C_1 и C_2 – асимптотические точки геодезических деформационных кривых.

4. Среднюю скорость накопления упругих сейсмогенных деформаций, вычисляемую по следующей формуле:

$$\dot{\gamma} = d_3 / \Delta t, \quad (1)$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$.

5. Время подготовки землетрясения:

$$T_{II} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{\dot{\gamma}}. \quad (2)$$

6. Предельную накопленную сдвиговую деформацию, которую выдерживают горные породы – угол γ .

7. Закон накопления упругих деформаций.

Известный ученый-геофизик В.А. Магницкий [Магницкий В.А., 1965] нашел, что рассматриваемый упругий изгиб удовлетворительно описывается кривыми

$$d = Ae^{\alpha x}, \quad (3)$$

где d – величина упругого смещения рассматриваемой точки земной поверхности; x – удаление этой точки от разлома; A, α – числовые параметры.

Совершенно очевидно, что деформированное состояние всех частей реальной среды не будет однозначно определяться формулой (3) из-за раздробленности среды и наличия в ней реологических неоднородностей. Поэтому для надежного определения закона упругого деформирования среды следует пользоваться статистико-вероятностными методами, т.е. определять эту закономерность по большому количеству точек наблюдений. При проведении высокоточных геодезических измерений величина отклонения (разброс) точек наблюдений от вычисленной экспоненциальной кривой и будет мерой отступления реальной среды от модели (упругое тело).

Ранее было отмечено, что экспериментальные данные согласуются с основными выводами рассмотренной деформационной модели. Этими данными являются результаты повторных измерений в геодезических сетях, покрывающих эпицентральные зоны случившихся сильных землетрясений. В настоящее время известно более десятка таких примеров; некоторые из них показаны на рис. 1. Мы остановимся на самом представительном по количеству точек наблюдений – землетрясении в Танго (Япония). Данные по этому землетрясению представлены на рис. 5.

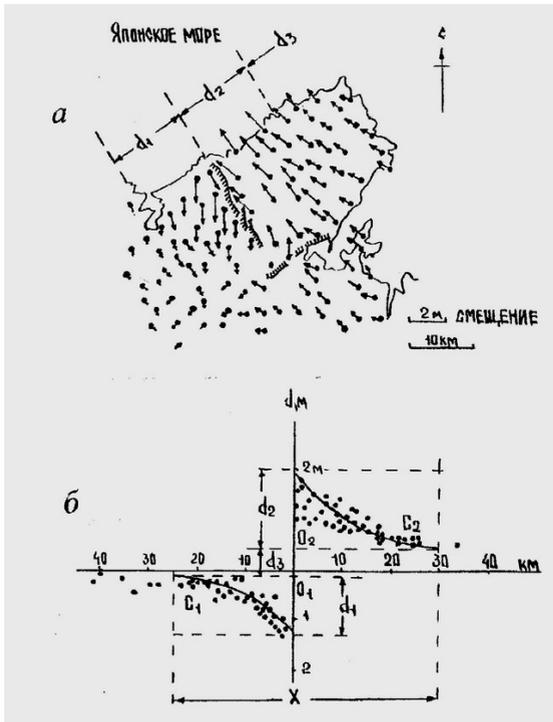


Рис. 5. Векторы горизонтальных смещений пунктов триангуляции, порожденных подвижкой по разлому Гомура при землетрясении Танго 1927 г. (а) и график этих смещений, изображенных на вертикальной плоскости, перпендикулярной к разлому Гомура (б). X – ширина очага землетрясения Танго

На рис. 5, а показаны векторы смещений геодезических пунктов в эпицентральной зоне землетрясения, произошедшего 7 мая 1927 г. Указанные векторы получены по данным триангуляционных измерений 1886 г. (исходная триангуляция) и 1930 г. (повторная триангуляция). Более наглядно распределение смещений этих пунктов в зависимости от их удаления от разлома Гомура представлено на рис. 5, б. Сравнение этого рисунка с рис. 4 (позиция t_23) убеждает в поразительном подобии картин смещений и деформаций для принятой нами модели и полученных из экспериментальных данных. Это является веским доказательством того, что столь поразительное подобие рисунков не является случайным и что рассматриваемая модель подготовки очага землетрясения соответствует реальному тектоносейсмическому процессу.

Из анализа данных повторных геодезических измерений в зоне землетрясения Танго можно получить следующие сведения об его очаге и процессе подготовки этого землетрясения. Ширина зоны подготовки X составляет около 44 км ($C_1O_1 + O_2C_2$). Всю длину очага определить нельзя из-за того, что он располагается как на суше, так и в море. Расположенная на суше часть очага имела длину около 20 км. Общая сумма накопленных в очаге упругих сейсмогенных смещений составила 3,4 м ($d_1 + d_2 + d_3$). Если процесс подготовки очага был равномерным, то ко времени выполнения исходной триангуляции (t_1 , 1886 г.) горные породы в очаге уже были изогнуты на величину в 2,6 м ($d_1 + d_2$). С 1886 по 1930 г. в очаге накопилось еще 0,8 м упругих смещений (d_3). Из-за того, что землетрясение случилось в 1927 г., а повторная триангуляция была выполнена в 1930 г., действительное значение накопленных упругих смещений будет несколько меньше. Но это различие не превысит нескольких процентов от общей суммы и поэтому в наших расчетах его можно не учитывать. Средняя скорость накопления упругих деформаций $V_{\text{нак}}$ составила около 2 см/год. При условии ее постоянства подготовка землетрясения Танго длилась около 170 лет, т.е. очаг этого землетрясения зародился примерно в 1750 г. (t_0). Предельная сдвиговая деформация лежит между $10^{-3} - 10^{-4}$. Упругие смещения в очаге накапливались по следующему закону:

$$d = 1,5e^{-0,14x} \quad (4)$$

Влияние неоднородностей среды, локальные смещения геодезических пунктов из-за динамических воздействий при землетрясении и прочие влияния, оцененные по разбросу наблюдавшихся точек, составили около 8 см при максимальном отклонении от кривой до 25 см.

Итак, теоретические соображения и имеющиеся экспериментальные данные убеждают нас в том, что с помощью геодезического метода можно определить следующее: а) размеры очагов произошедших землетрясений; б) параметры и характеристики механических процессов в очагах; в) временные интервалы подготовки землетрясений.

Однако, как нетрудно догадаться, этим не исчерпываются возможности геодезического метода в проблемах сейсмичности. Все вышеизложенное позво-

ляет сделать обоснованный вывод о том, что геодезический метод можно с успехом использовать для обнаружения объемов горных пород, в которых идет процесс накопления упругих сейсмогенных деформаций. Благодаря этому открываются реальные перспективы для научно обоснованного использования геодезического метода в проблеме прогноза землетрясений – для точного и достоверного прогнозирования мест подготовки сильных землетрясений (прогноз места) и определения размеров готовящихся очагов землетрясений (прогноз максимально возможной силы).

Методики реализации указанных прогнозов места и силы подробно изложены в [Певнев, 1988, 1998, 2003] и поэтому здесь с целью сокращения объема статьи изложим их кратко.

Приведенные выше результаты геодезических и сейсмологических исследований явились экспериментальной основой для разработки деформационной модели подготовки очага сильного корового землетрясения. Следует отметить, что при разработке этой модели были учтены следующие современные представления: о внутреннем строении земной коры и литосферы, их тектоническом строении и происходящих в них тектонических процессах; о существовании активных глубинных разломов; о реологической расслоенности коры и литосферы в вертикальном разрезе и существовании в земной коре сейсмогенного слоя; о пространственном распределении сильных коровых землетрясений – их приуроченности к глубинным разломам в пределах сейсмогенного слоя земной коры и многое другое.

Результатом совместного анализа всей совокупности перечисленных сведений и данных явилась разработка концепции формирования очагов сильных землетрясений, которая и позволила предложить деформационную модель очага. Существенные, определяющие черты и признаки этой модели основные гипотезы, экспериментальные сведения, параметры и др. представлены в следующих выводах).

1. Ответственным за коровую сейсмичность является самый верхний, так называемый сейсмогенный слой земной коры мощностью 10–25 км, породы которого способны накапливать значительные упругие напряжения и хрупко разрушаться (порождать землетрясения) при достижении предела их прочности.

2. Очаги сильных коровых землетрясений генетически связаны с рассекающими сейсмогенный слой активными тектоническими разломами.

3. Причины зарождения, созревания и разрушения таких очагов в тех или иных участках разломов обуславливаются или полным прекращением, или существенным уменьшением тектонических смещений на этих участках. Выше отмечалось, что Г.А. Гамбурцев такие участки назвал "спайками"; чем длиннее такая "спайка", тем больше сейсмической энергии она способна накопить.

4. При подготовке очага сильного корового землетрясения сейсмогенные деформации накапливаются по всей толще сейсмогенного "упругого" слоя земной коры: от земной поверхности и до его подошвы (10–25 км).

5. Вопреки укоренившимся представлениям о том, что сейсмогенной деформацией является упругий однородный сдвиг установлено, что в действительности такая деформация представляет собой неоднородный, но закономерно изменяющийся в пространстве упругий сдвиг, т.е. закономерный упругий изгиб горных пород в готовящемся очаге землетрясения.

6. Накапливаемый горными породами готовящегося очага землетрясения упругий сейсмогенный изгиб распределяется в этом очаге экспоненциально: он максимален в центральной части сейсмогенной зоны и быстро убывает в обе стороны от этой зоны к периферийным, боковым частям очага. В общем случае упругая деформационная кривая имеет в очаге вид двух отрезков, симметричных относительно центральной точки. Максимальное изменение кривизны кривой совпадает с ортогональным к поверхности разлома направлением (рис. 5).

7. В очагах сильных землетрясений ($M > 7$) указанный упругий изгиб проникает в тела контактирующих по сейсмогенному разлому блоков на 10–25 км, т.е. полная ширина зоны накопления упругого изгиба (ширина очага) составляет 20–50 км. Максимальные упругие смещения горных пород в очагах сильных землетрясений измеряются метрами.

8. Земная поверхность, являющаяся верхней границей готовящегося очага сильного корового землетрясения, также подвергается нарастающему во времени закономерному изгибу. Факт закономерного изгибания самых верхних частей земной коры над очагами землетрясений достоверно подтверждается экспериментальными данными.

9. Нарастающий во времени закономерный изгиб земной поверхности является единственным достоверным признаком, однозначно указывающим на то, что в исследуемой части сейсмогенной зоны идет процесс накопления сейсмогенных деформаций.

Без сомнения, главным результатом выполненных исследований является установление факта существования единственно достоверного, прямого, поддающегося непосредственному измерению, признака подготовки очага землетрясения. Таким признаком – предвестником готовящегося землетрясения – является закономерная деформация земной поверхности над зреющим очагом. Исследования позволили определить и те параметры деформационного поля очага, знание которых необходимо и достаточно для осуществления двух прогнозов: точного прогноза места очага и его максимально возможной силы.

С полной определенностью можно говорить о том, что единственным ключом к достоверному прогнозу места готовящегося очага является закономерный изгиб земной поверхности, максимальный в ортогональном к разлому направлении. Реальный путь к прогнозу максимально возможной силы будущего землетрясения лежит через определение размеров участка земной поверхности закономерно деформируемого подготовкой землетрясения, т.е. путем непосредственного измерения на земной поверхности длины и ширины очага, а при со-

блюдении определенных условий также и величины накопленных сейсмогенных деформаций.

О принципиальных особенностях геодезических построений, нацеленных на осуществление прогнозов места и силы готовящихся землетрясений

Обратимся к требованиям, которые рассматриваемая проблема ставит перед геодезией.

По-существу, единственным и определяющим требованием является достоверное установление факта закономерного изгиба земной поверхности. Для осуществления точного прогноза места очага и его силы необходимо обнаружить участок сейсмогенной зоны, испытывающий закономерное упругое изгибание и определить его размеры. Именно решению этой задачи должны быть подчинены вид и размеры специальных геодезических построений, количество пунктов и их взаимное расположение в этих построениях.

Говоря о создании такой системы, необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Где она должна располагаться?

2. Какой вид должны иметь геодезические построения, составляющие систему?

3. Каковы принципы размещения этих построений и частота их опроса?

1. Как известно, сильные землетрясения происходят в так называемых сейсмогенных зонах, основными сейсмогенными структурами которых являются сейсмогенные разломы, изменение ритма тектонических смещений в которых является причиной накопления сейсмогенных деформаций. Именно в сейсмогенных зонах зарождаются, созревают и разрушаются очаги сильных коровых землетрясений и поэтому геодезическая система, рассчитываемая на прогноз землетрясений, должна быть приурочена к сейсмогенной зоне. Определение точного местонахождения сейсмогенных зон является одной из главных задач сейсмического районирования.

2. Конструкция геодезических построений системы должна обеспечить измерение изгибных деформаций земной поверхности.

Так как ширина очаговой зоны составляет 20–50 км, то в ортогональном к сейсмогенному разлому направлении размеры геодезического построения должны быть порядка 30–60 км. Это необходимо для того, чтобы определить форму упругой кривой на всем ее протяжении. Если сейсмогенная зона совпадает с зоной раздела между сушей и водой, то можно ограничиться созданием прогнозных геодезических построений только на суше, т.е. для поиска деформационного предвестника использовать лишь половину ширины сейсмогенной зоны.

Что касается размеров построения вдоль разломной зоны, то, конечно же, было бы идеальным иметь специальные геодезические сети, полностью пере-

крывающие сейсмогенные зоны. Однако если это даже и будет возможно в будущем, то на начальном этапе исследований можно ограничиться пересекающими сейсмогенную зону сравнительно узкими построениями – от прямолинейной (створ) или слабо изогнутой линии и до того или иного вида геодезической сети шириной около километра.

Итак, на начальном этапе исследований оптимальным геодезическим построением для определения формы упругой кривой можно считать прямолинейное геодезическое построение (геодезический прогнозный профиль), ортогонально пересекающее сейсмогенную зону и имеющее длину несколько более ее ширины (рис. 6).

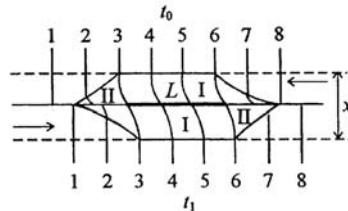


Рис. 6. Модель упругого деформирования земной поверхности над очагом готовящегося землетрясения (в момент t_1). Линии (1-1, ... 8-8) – геодезические профили, которые в момент зарождения очага (t_0) представляли собой сплошные прямые линии, в процессе подготовки очага были либо разорваны и смещены по разлому (1-1 и 8-8), либо 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

Для уверенного определения вида деформирования исследуемого участка земной поверхности профиль должен иметь большую густоту пунктов (датчиков измеряемых смещений). Причем частота расположения пунктов вдоль профиля может быть переменной: в наиболее деформируемой центральной части сейсмогенной зоны пункты нужно располагать чаще, а к краям зоны их можно размещать реже. С учетом экспоненциального вида искомой упругой кривой можно считать оптимальным следующее распределение пунктов вдоль профиля. В центральной части зоны, примерно на пяти километрах ее длины, расстояния между смежными пунктами целесообразно ограничить 300–500 м. Дальше эти расстояния могут постепенно возрастать, но не быть более одного километра. Совершенно очевидно, что это усредненные характеристики, которые должны корректироваться для каждого конкретного профиля.

Такое расположение пунктов можно считать оптимальным для фиксации как нарастающего во времени упругого изгиба (максимального в зоне сейсмического шва и вблизи него), так и сбрасываемых напряжений (деформаций), возникающих в очаге при его разрушении, что, как будет показано ниже, необходимо для осуществления прогноза времени. Повторные измерения на таком прогнозном профиле позволят определять действительный вид деформирования исследуемого участка сейсмогенной зоны и тем самым ответить на вопрос – готовится или нет в этом месте очаг землетрясения. **Это и есть прямой, реаль-**

ный путь к точному и достоверному прогнозу местоположения готовящегося очага землетрясения.

3. Для решения вопроса о рациональном размещении геодезических прогнозных профилей вдоль исследуемой сейсмогенной зоны следует воспользоваться среднестатистическими функциональными зависимостями между силой землетрясения – магнитудой M , длиной очага – L и происходящей при землетрясении подвижкой в очаге – D [Ризниченко, 1985]. Такие данные приведены в таблице.

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

С полным основанием мы можем считать, что происходящая при землетрясении подвижка в очаге (D), численно равна максимальному упругому смещению, накопленному в очаге к моменту землетрясения. Ведь землетрясение это и есть сброс накопленных в очаге упругих смещений горных пород, т.е. и есть та самая величина D .

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.

Что касается частоты расположения прогнозных профилей вдоль сейсмогенной зоны, то она зависит от минимальной силы землетрясения, очаг которого должен быть распознан. Так, если ставить целью прогнозировать землетрясения с магнитудой $M \geq 7$, длины очагов которых оставляют 60 и более км, то профили можно располагать примерно через 30–40 км. Этот вывод следует из того, что при шаге размещения прогнозных профилей в 30 км очаг, способный породить землетрясение с $M = 7$, не будет пропущен. Длина очага землетрясения с $M = 6$ составляет примерно 20 км, и поэтому профили можно располагать не реже чем через 10–15 км. Для землетрясения с $M = 5$ прогнозные профили следует размещать не реже чем через 4–6 км, так как длина очага такого землетрясения около 8 км.

Так как сила землетрясения функционально связана с размерами его очага, то, как уже отмечалось выше, к прогнозу силы готовящегося землетрясения можно подойти через измерение размеров его очага. Длина и ширина очага готовящегося землетрясения могут быть определены геодезическим методом. Для

этого после осуществления прогноза места на том или ином участке сейсмогенной зоны, который можно рассматривать в качестве готовящегося очага землетрясения, необходимо создать дополнительную систему геодезических прогнозных профилей. Для полной уверенности в полном перекрытии геодезическими построениями всей длины готовящегося очага необходимо, чтобы длина участка сейсмогенной зоны, покрываемого дополнительными профилями, превышала длину очага максимального для этой сейсмогенной зоны землетрясения. Периодические повторные измерения на такой модернизированной системе прогнозных профилей позволят определять размеры зреющего очага землетрясения и следить за их изменениями. **Так можно решить проблему прогноза максимально возможной силы готовящегося землетрясения.**

О прогнозе времени землетрясения

Что касается прогноза времени землетрясения, то в отличие от прогнозов места и силы главным препятствием на пути его осуществления является незнание реальных закономерностей процессов разрушения очагов. Совершенно очевидно, что на современном уровне знаний о механических и других характеристиках среды, в которой происходят сильные землетрясения, знаний перечня сил и закономерностей их индивидуального и комбинированного воздействия на созревший очаг и многого другого к осуществлению указанных прогнозов можно подходить лишь через изучение закономерностей развития и протекания процессов разрушения очагов землетрясений. 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, т.е. 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 непосредственно над реально существующим очагом готовящегося землетрясения. Совершенно очевидно, что в этом случае схема расположения пунктов комплексных очаговых наблюдений должна обеспечивать разрешения, достаточные для регистрации порождаемых этим очагом даже очень слабых и быстро затухающих с удалением от их источника аномалий. Можно полагать, что знание точного местоположения очага и наличие кондиционной системы наблюдений обеспечат корректность решаемых обратных задач. 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.**

Заключение

Возможно ли в настоящее время решение проблемы практически значимого прогноза землетрясений? Да, возможно. Для этого нужно в корне изменить отношение к геодезическому методу. До сих пор он и мыслился, и использовался лишь как один из многих для обнаружения разрозненных деформационных аномалий. Поэтому необходимо как можно скорее приступить к его использованию по прямому назначению, т.е. для осуществления прогнозов места и максимально возможной силы готовящихся очагов землетрясений. Заблаговременное осуществление этих двух прогнозов несомненно приблизит и решение проблемы прогноза времени землетрясения.

Совершенно очевидно, что 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 и определены его размеры, на нем нужно будет создавать систему комплексных очаговых наблюдений, нацеленную на исследование тонкой структуры различных процессов, происходящих в очаге на разных стадиях его развития. Это и позволит приблизить решение проблемы прогноза времени землетрясений.

Крайне существенно то, что геодезический метод позволяет обнаруживать готовящиеся очаги сильных коровых землетрясений заблаговременно: практически с самого зарождения очага, т.е. за десятки и более лет до землетрясения. Заблаговременное обнаружение очагов землетрясений позволит: 1) приступить к исследованиям, нацеленным на решение проблемы прогноза времени землетрясения с удовлетворяющей практические цели точностью; 2) осуществлять рациональное планирование хозяйственной деятельности на потенциально опасной территории; 3) приступить к опробованию методов искусственного воздействия на зреющий очаг с целью безопасного снятия накапливаемых в нем сейсмогенных напряжений.

Совершенно очевидно, что предлагаемые геодезические прогнозные системы можно будет создавать поэтапно – в первую очередь на тех участках сейсмогенных зон, землетрясения в которых несут прямые угрозы человеку, его материальным богатствам и экологии.

Таким образом, наиболее обоснованной и перспективной можно считать следующую стратегию прогнозных исследований.

На выбранных по тем или иным практическим (города, АЭС, химические заводы и др.) или научным соображениям участках сейсмогенных зон создаются геодезические прогнозные сети, способные решать задачу прогнозов места и силы землетрясения, а затем в местах обнаруженных готовящихся очагов организируются нацеленные на прогноз времени наблюдательные сети комплексных исследований.

С целью экономии средств на участках сейсмогенных разломов, выбранных для создания геодезических прогнозных систем, вначале можно ограничиться закладкой укороченных (рекогносцировочных) геодезических профилей длиной до 10 км. В этом случае создавать кондиционные профили (длиной 30–50 км) можно будет лишь после того, как по результатам мониторинга на том или ином участке будет установлен факт накопления сейсмогенных деформаций.

Литература

- Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э. и др. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1993, N3, с. 12–23.
- Безухов Н.И., Лужин О.В. Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. – М.: Высшая школа, 1974. – 200 с.
- Гамбурцев Г.А. Избранные труды. – М.: изд-во АН СССР, 1960. – 461 с.
- Горшков Г.П. Александр Петрович Орлов (из истории русской сейсмологии). – М.: Изд-во АН СССР, 1955, с. 62.
- Кейлис-Борок В.И. До аплодисментов еще далеко // «Известия», № 307, 2 ноября 1989 г.
- Кондратьев О.К. Разведочная геофизика с целью прогноза землетрясений // Геофизика, 1995, № 3, с. 19–25.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. – М.: Недра, 1965. – 380 с.
- Мушкетов И.В. Физическая геология. Ч. 1. – СПб., 1899. – 784 с.
- Орлов А.П. Землетрясения, их соотношение с другими явлениями природы. Заметки по поводу землетрясений 1887 г. – Казань, 1887. – 170 с.
- Певнев А.К. Прогноз землетрясений – геодезические аспекты проблемы // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1988, № 12, с. 88–98.
- Певнев А.К. Предсказывать землетрясения можно // Вестник РАН, 1998, т. 68, № 11, с. 999–1006.
- Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. – М.: ГЕОС. 2003. – 153 с.
- Певнев А.К. О главных причинах, не позволяющих решить проблему прогноза землетрясений методами обратных задач // Ученые записки РГГМУ. – СПб., 2009, с. 156–170.
- Поиски предвестников землетрясений // Международный симпозиум, 27 мая – 3 июня 1974 г. – Ташкент: изд-во «Фан», 1976. – 263 с.
- Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985, с. 408.