

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55518

## О ПРИЧИНАХ КОРОВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ МЕТОДАМИ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ

© 2014 А.К. Певнев<sup>1</sup>, д.т.н., В.Б. Заалишвили<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., проф.

<sup>1</sup>Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, e-mail: an.pevnev@yandex.ru; <sup>2</sup>Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и РСО-А, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi\_ras@mail.ru

Рассмотрены пути формирования очагов коровых землетрясений и возможности их прогноза.

**Ключевые слова:** концентратор напряжений, упругость, сейсмогенная деформация, прогноз землетрясений.

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

*Ф.Н. Красовский.*

### 1. О причине зарождения и подготовки очагов коровых землетрясений

Есть все основания считать, что коровая сейсмичность является следствием тектонической активности Земли, порождаемой глубинными эндогенными процессами, которые на земной поверхности проявляются в ее непрерывном движении. Энергией этих процессов создаются горы и впадины, движутся континенты и огромные участки океанического ложа. Они разбили земную кору (литосферу) на множество блоков и заставляют смещаться эти блоки относительно друг друга по разделяющим их глубинным разломам. Скорости относительных смещений систем блоков по указанным разломам существенно различаются для различных тектонических структур Земли. Наибольшую скорость смещения имеют блоки в тектонически активных горных структурах Земли – в орогенах. Здесь скорости измеряются сантиметрами в год. Так на разломе Сан-Андреас в Калифорнии эта скорость составляет 5 см/год, а в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня (Вахшский надвиг) – 2,5 см/год. С максимальной, измеренной геодезическими методами, скоростью – 10 см/год смещается ложе Тихого океана.

С существенно меньшими скоростями смещаются блоки земной коры в **тектонически менее активных структурах Земли**. К таким структурам относятся обширные равнинные участки земной коры – платформы. Скорости смещений блоков на платформах примерно на порядок меньше чем в орогенах и измеряются миллиметрами и даже десятками долями мм/год.

Структуры, отличающиеся большими скоростями смещений в разломах, являются и наиболее сейсмоопасными, в то время как тектонически малоактивные структуры являются менее сейсмоопасными. Это позволяет сделать обоснованный вывод о существовании прямой корреляционной зависимости между сейсмической активностью тектонических структур и скоростями смещений блоков земной коры в этих структурах и, следовательно, причину сейсмичности следует искать в особенностях поведения этих скоростей. Определим вид возможных вариаций скоростей, при которых в том или ином участке разлома возможно зарождение очага землетрясения.

Совершенно очевидно, что если поверхности разделенных разломом блоков не препятствуют их перемещению, т.е. блоки как бы «скользят» относительно друг друга, то эта ситуация исключает возможность зарождения очага сильного корового землетрясения на этом участке разлома. Если же возникает ситуация, мешающая на каком либо участке сейсмогенного разлома свободному перемещению блоков, т.е. если на этом участке разлома появится так называемый концентратор напряжений.

Таким образом, рассматривая возможные причины зарождения очага землетрясения, т.е. старта процесса накопления сейсмогенных деформаций в этом очаге, можно прийти к выводу, что начало этих процессов обусловлено уменьшением (вплоть до полного прекращения) тектонических движений в том или ином конкретном участке сейсмогенного разлома. Выдающиеся сейсмологи СССР Г.А. Гамбурцев и Ю.В. Ризниченко [Гамбурцев, 1960; Ризниченко, 1985] полагали, что указанные изменения скоростей смещений в разломах могут происходить из-за различных физико-химических и механических процессов.

Среди причин, порождающих концентраторы напряжений в разломе можно назвать следующие: вариации локальных и региональных полей напряжений, изменяющие величину коэффициента трения в разломе; влияние температуры и давления; вариации флюидные процессы; механические «зацепы» блоков из-за неровностей их соприкасающихся поверхностей и др.

Теоретические соображения о реальности возникновения участков задержек смещений в сейсмогенных разломах сводятся к следующему. Тектоническое коровое землетрясение – это порождающее сдвиговые волны быстрое (сейсмическое) разрушение некоторого объема горных пород (очага землетрясения), вызванное накопленными в этом очаге упругими сдвиговыми деформациями (напряжениями). А это означает, что непременным условием подготовки очага землетрясения является наличие в зоне разлома механически прочной, консолидированной среды (жесткого включения), обладающей упругими свойствами и способной накапливать потенциальную упругую энергию.

Таким образом, очаг в стадии накопления потенциальной упругой энергии (в фазе созидания) должен представлять собой стабильное, пластически мало деформируемое включение в сейсмогенном слое земной коры.

Так как при подготовке очага землетрясения упруго деформируются лишь части блоков, примыкающие к остановившемуся участку разлома, то это обстоятельство не приведет к нарушению ритма тектонических смещений частей блоков, не затронутых указанным упругим деформированием.

Таким видится путь зарождения и формирования очага корового землетрясения.

Григорий Александрович Гамбурцев рассматриваемые консолидированные участки в сейсмогенных разломах очень метко назвал «спайками». Он прозорливо

полагал, что в сейсмогенных разломах «наряду с процессом разрушения – уменьшения прочности отдельных участков сейсмических швов, – может идти обратный процесс «залечивания» разрушенных мест, образования новых «спаек» между соседними блоками. Таким образом, происходит закономерная смена взаимосвязанных процессов медленных и быстрых движений, накопления и разрушения напряжений, увеличения и уменьшения прочности» [Развитие идей ..., 1982].

Следует отметить, что реальность существования «гипотетических спаек Гамбурцева» подтверждается самим фактом существования коровой сейсмичности. Возникновение сильных землетрясений в верхнем слое земной коры говорит о том, что в сейсмогенных разломах этого слоя, в тех или иных их участках, по тем или иным причинам возникают условия для накопления в том или ином объеме горных пород предельных упругих сейсмогенных деформаций.

Можно говорить о следующей последовательности процессов зарождения и формирования очагов коровых землетрясений.

Непременным условием зарождения очага землетрясения является возникновение концентратора напряжений, препятствующего тектоническим смещениям в месте его образования, приводящее к образованию в той или иной зоне разлома механически прочного, консолидированного объема горных пород (спайки). Если порождаемый этим концентратором импульс силы будет существенно меньше количества движения всей системы блоков данного разлома, то он не повлияет на смещение блоков по разлому за зоной действия этого концентратора. Это обстоятельство приведет к образованию вокруг концентратора локального поля упругих напряжений, что и спровоцирует процессы возникновения и накопления упругих смещений в горных блоках, примыкающих к остановившемуся участку разлома.

Таким видится путь формирования очагов коровых землетрясений.

Таким образом, очаг в стадии (фазе) созидания должен представлять тело, обладающими деформациями которого являются упругие деформации – **это условие является необходимым и достаточным для зарождения и формирования очага сильного землетрясения.**

Эта спайка, означающая остановку смещений блоков в том или ином участке разлома при непрекращающемся движении двух протяженных, взаимно смещающихся систем блоков и породит здесь поле упругих напряжений, т.е. этот участок явится зародышем очага землетрясения. Теоретическое объяснение возникновения такого поля упругих напряжений сводится к следующему: импульс силы, возникающий из-за образования концентратора напряжений в той или иной части системы, является ничтожно малым в сравнении с количеством движения всей системы и поэтому он не повлияет на скорость смещения всей системы. Следует еще раз сослаться на то, что сам факт существования коровой сейсмичности является бесспорным подтверждением тому, что указанный процесс «закачки» упругой энергии в некоторый объем горных пород вокруг остановившегося участка разлома: в очаг землетрясения, имеет место в действительности.

**Итак, мы имеем полное право заключить, что причиной коровой сейсмичности является полная (или частичная) задержка смещений блоков земной коры в том или ином участке сейсмогенного разлома.**

Следует заметить, что выделяемая при землетрясениях сейсмическая энергия является очень незначительной долей тектонической энергии, затрачиваемой на

тектонические смещения систем блоков по разделяющим их разломам. По оценкам [Ризниченко, 1985] для района Кавказа эта доля не превышает 1%. Даже трудно себе представить, что творилось бы на Земле, если бы эта доля была бы равна, например, 40–60%. Можно считать, что система тектонических смещений блоков земной коры, к счастью для нас, работает с очень небольшим «браком», который, тем не менее для Земли весьма ощутим.

## **2. Поле упругих напряжений, возникающее из-за образования «спайки» и вид сейсмогенной деформации, порождаемой этим полем**

Для определения вида и размеров рассматриваемого поля упругих напряжений 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, Лужин, 1974].

Для обнаружения очагов готовящихся землетрясений принцип Сен-Венана вполне применим в силу несопоставимости размеров сейсмогенных разломов (тысячи километров) и размеров очагов землетрясений – длина очага разрушительного землетрясения с  $M=7$  составляет 50–60 км и даже для сейсмической катастрофы с  $M=8$  не превышает 200 км.

Согласно этому принципу вокруг возникшего концентратора напряжений (спайки) возникает местное поле упругих напряжений максимальное в месте зарождения спайки и экспоненциально уменьшающееся с удалением от этого участка разлома.

Совершенно очевидно, что локальное поле упругих напряжений с экспоненциальным характером затухания напряжений должно порождать **изгибные деформации горных пород** в готовящемся очаге землетрясения.

Таким образом, мы получили теоретическое обоснование вида деформационного предвестника корового землетрясения – **это упругий изгиб горных пород в очаге готовящегося землетрясения.**

Проверить справедливость этих теоретических соображений можно с помощью имеющихся в настоящее время геодезических экспериментальных данных. Речь идет о результатах повторных геодезических измерений в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений, выполненных до и после этих землетрясений (рис. 1).

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 расстояния 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. Этот факт убедительно говорит о том, что порождаемые при

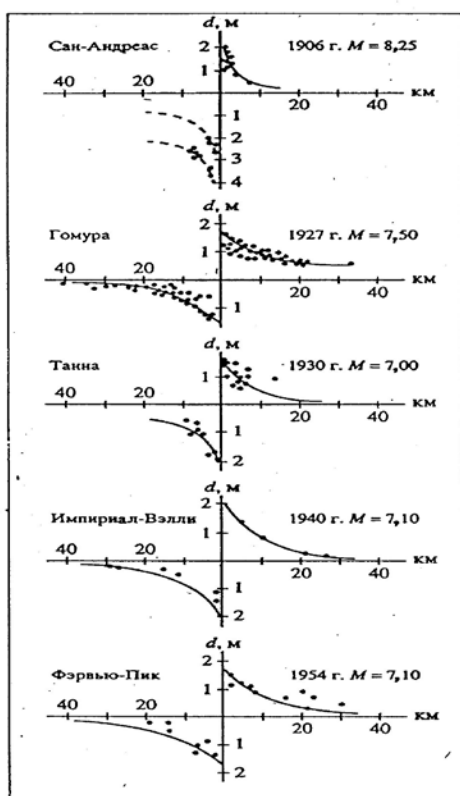


Рис. 1. Реальное распределение смещений пунктов триангуляции ( $d$ ) в зонах сейсмогенных разломов при сильных коровых землетрясениях в зависимости от удаления геодезических пунктов от разломов, по [Касахара, 1985]

сильных землетрясениях смещения геодезических пунктов несут информацию о едином механизме подготовки этих землетрясений. Крайне важно и то, что этот механизм един для разных континентов. Следовательно, он является универсальным.

Причина появления указанной закономерности смещений пунктов триангуляции при землетрясении демонстрируется рис. 2.

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 (упругий изгиб): кривая  $ab$ . Момент  $t_2$  – положение горных пород после землетрясения, при котором произошли следующие события: магистральный разрыв горных пород в очаге; смещение горных пород по этому разрыву и благодаря этому сброс накопленных в них ранее изгибных сейсмогенных деформаций – прямолинейные отрезки  $a$  и  $b$ .

Теперь обратимся к рис. 2Б, который отличается от рис. 2А лишь тем, что в нем добавлена прямая  $ek$ , представляющая собой прямолинейное геодезическое построение (геодезический профиль) созданное в момент  $t_1$ , над зреющим очагом землетрясения. Вид прямолинейного геодезического профиля претерпел на первый взгляд парадоксальные изменения, превратившись в два искривленных отрезка, смещенных относительно друг друга. Однако в этом нет ничего загадочного – по условиям задачи профиль был создан на уже деформированных упругим изгибом горными породами готовящегося очага землетрясения. И, следовательно, при сбросе упругих напряжений горные породы сместились по разлому и при этом вы-

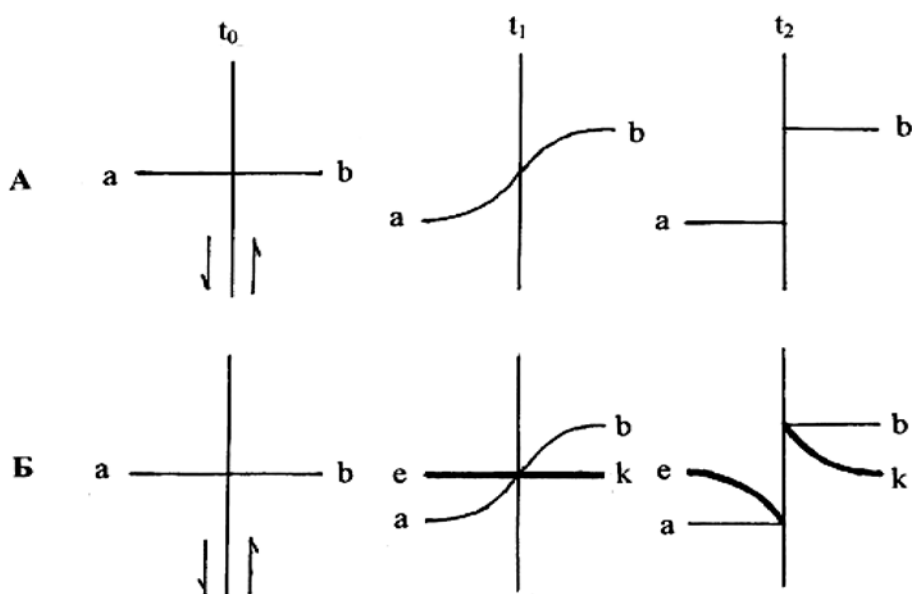


Рис. 2. Объяснение явления экспоненциального распределения смещений геодезических пунктов в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений

прямилась, а прямолинейный геодезический профиль над очагом наоборот превратился в два изогнутых отрезка, сохранивших кривизну кривой **ab**.

Совершенно очевидно, что эти два отрезка являются зеркальным отображением двух половинок упругой кривой **ab**, так как в результате землетрясения кривая **ab** и прямая **ek** обменялись своими формами и, следовательно, в этих изогнутые отрезки сохранилась информация о величине упругих деформаций, накопленных в очаге к моменту создания этого геодезического профиля. Из анализа рис. 2 следует, что во всех приведенных на этом рисунке 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, аналогичных поведению горных пород в момент  $t_2$ . Это говорит о том, что сильные землетрясения готовятся долго – многие десятки и более лет.

Таким образом, нам удалось расшифровать загадку появления кривых на рис. 1.

Эти экспериментальные данные убедительно подтвердили высказанные ранее теоретические соображения о том, что процессом подготовки корового землетрясения является накопление в его очаге упругих изгибных сейсмогенных деформаций. Кроме того они несут бесценную информацию о величине упругого изгиба горных пород, накопленного в каждом очаге землетрясения к моменту создания над ними исходных триангуляций.

Следует так же отметить, что по данным этого рисунка можно определить и ширину очага землетрясения, которую можно считать равной ширине зоны проникновения упругих смещений в тела контактирующих по разлому блоков земной коры. Для этого нужно определить расстояние между точками выхода на асимптоты экспоненциальных кривых этих блоков. Согласно данным рис. 1 эти расстояния измеряются несколькими десятками километров: от 40 до 60.

### 3. Об участии земной поверхности в процессе подготовки очага землетрясения, и обоснование возможности использование метода прямых задач для решения проблемы прогноза землетрясений

Анализ данных повторных геодезических измерений в эпицентральных зонах сильных землетрясений позволяет сделать следующие крайне важные для рассматриваемой проблемы выводы.

1. Коровая сейсмичность обусловлена нарушением ритма тектонических смещений в тех или иных участках сейсмогенных разломов.

2. Деформационным признаком подготовки очага землетрясения является, накапливаемый упругий изгиб в горных породах этого очага.

3. Указанный упругий изгиб удовлетворительно описывается кривыми  $d = Ae^{ax}$ , где  $d$  – величина упругого смещения рассматриваемой точки земной поверхности;  $x$  – удаление этой точки от разлома;  $A$  – величина максимального смещения бортов разлома при землетрясении,  $a$  – интегральная характеристика упругих свойств горных пород в очаге землетрясения.

4. При подготовке землетрясения упругие деформации проникают в тела контактирующих по разлому блоков на 20–30 км, т.е. полная ширина очага сильного землетрясения составляет 40–60 км.

5. Процесс накопления в очаге упругих деформаций захватывает и земную поверхность, что позволяет осуществлять **точный прогноз места готовящегося очага** землетрясения методами решения прямой задачи.

6. Отслеживать процесс подготовки очага землетрясения, т.е. достоверно определять вид упругой кривой на таких базах (десятки километров) возможно **лишь геодезическим методом** [Певнев, 2003].

Однако возможности геодезического метода не ограничиваются только прогнозом места готовящегося очага землетрясения: он позволяет также осуществлять прогноз силы землетрясения, которую может породить этот очаг а ускорить вопрос решения прогноза времени готовящегося землетрясения.

Для решения вопроса о силе готовящегося землетрясения, прогноз которой возможен геодезическим методом, следует воспользоваться функциональной зависимостью между силой землетрясения – магнитудой  $M$  и длиной очага  $L$ . Такие данные приведены в таблице 1 [Ризниченко, 1985].

Таблица 1

#### Зависимость силы землетрясения ( $M$ ) 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, если будет известна длина очага готовящегося землетрясения  $L$ , то это позволит предсказать и максимальную силу землетрясения (магнитуду  $M$ ), которую может породить зреющий очаг. Совершенно очевидно, что это достижи-мо геодезическим методом. Для решения этой проблемы необходимо и достаточно определить длину упруго деформированного участка земной поверхности над об-наруженным ранее очагом зреющего землетрясения. Вопрос о виде геодезических построений, необходимых для определения размеров готовящегося очага землетря-сений, рассмотрен в [Певнев, 2003].

Что касается величины  $D$  в таблице, то, так как основной сброс накопленных упругих напряжений происходит при основном (магистральном) разрыве горных пород в очаге, то определенную сейсмологическим методом величину подвижки бортов разлома при землетрясении ( $D$ ), можно считать численно равной макси-мальному сейсмогенному упругому смещению, накопленному в очаге к моменту землетрясения.

Следует отметить, что осуществление прогноза места готовящегося очага зем-летрясения откроет возможности и для решения проблемы прогноза времени этого землетрясения [Певнев, 2003].

Экспериментальным полигоном для исследований выбран Владикавказский разлом, представляющий наибольшую опасность для столицы Республики Север-ная Осетия-Алания – г. Владикавказа [Заалишвили и др., 2011]. Геодезические на-блюдения позволят ответить на главный вопрос – формируется ли очаг сильного землетрясения в зоне Владикавказского разлома.

Таким образом, использование геодезических исследований в решении пробле-мы прогноза землетрясений методами прямых задач позволит осуществлять точ-ный прогноз места и силы готовящегося землетрясения, а так же ускорит решение проблемы прогноза времени землетрясения.

### Литература

1. Безухов Н.И., Лужин О.В. Приложение методов теории упругости и пла-стичности к решению инженерных задач. М.: Высшая школа. 1974. 200 с.
2. Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза земле-трясений. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР. 1960, с. 427-435
3. Заалишвили В.Б., Певнев А.К., Рогожин Е.А. О геодезическом мониторинге для прогноза землетрясений на Северном Кавказе (на примере владикавказского прогнозного полигона) // Геология и геофизика Юга России №2 2011. С. 33-40.
4. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
5. Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС. 2003. 153 с.
6. Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. К 80-летию со дня рождения академика Григория Александровича Гамбурцева. Изд-во «Наука», М.: 1982, 320 с.
7. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.



DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55518

**ON THE REASONS OF EARTH CRUST SEISMICITY  
AND POSSIBILITY OF THE EARTHQUAKES FORECAST  
BY THE SOLUTION METHODS OF THE STRAIGHT PROBLEMS**

© 2014 A.K. Pevnev<sup>1</sup>, Sc. Doctor (Tech.), V.B. Zaalishvili<sup>2</sup>,  
Sc. Doctor (Phys.-Math.)

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,  
Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow 123995, Russia e-mail: an.pevnev@yandex.  
ru; <sup>2</sup>Center of geophysical investigations of VSC of RAS and RNO-A, Russia, 362002,  
Vladikavkaz, Markov street, 93a, e-mail: cgi\_ras@mail.ru

The ways of the crustal earthquakes centers formation and possibility of their forecast are examined.

**The keywords:** stress concentrator, elasticity, seismogenic deformation, the forecast of earthquakes.