



Олема, Калифорния. Разлом, образовавшийся во время Великого землетрясения 1906 г. Фото 1906.

УДК 53.01:550.343



Певнев А.К.

Прогноз землетрясений возможен. (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений) Часть 2. Возвращение к Г.А. Гамбурцеву: деформационная модель подготовки очага корового землетрясения¹

Певнев Анатолий Кузьмич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Института физики Земли РАН

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-8467-7486>

E-mail: anatoly-k-pevnev@j-spacetime.com; an.pevnev@yandex.ru

Прогноз землетрясений – одна из актуальнейших проблем человечества. Попытки решить эту проблему без использования каких-либо моделей подготовки и реализации очагов землетрясений успехом не увенчались из-за некорректности задач. Во второй части статьи обосновывается необходимость в решении проблемы прогноза землетрясений возвращения на путь, намеченный Г.А. Гамбурцевым. В статье представлены основные положения деформационной модели подготовки очага корового землетрясения, полностью подтвердившей правильность гамбурцевского пути к прогнозу коровых землетрясений, а также выводы из этой модели.

¹ Продолжение. Начало см.: Певнев А.К. Прогноз землетрясений возможен. (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Часть 1. Г.А. Гамбурцев и возможность прогнозирования землетрясений // *Пространство и Время*. 2015. № 4(22). С. 195 – 201.

Ключевые слова: академик Григорий Гамбургцев; прогноз землетрясений; коровая сейсмичность; очаги землетрясений; сейсмический шов; сейсмогенная деформация.

О причине зарождения и подготовки очагов коровых землетрясений

Рассматривая проблему прогноза землетрясений, следует иметь в виду, что Земля подвержена двум видам сейсмичности: коровой и глубокофокусной. Коровые землетрясения происходят в земной коре, а глубокофокусные – в расположенной под земной корой мантии Земли. Основная масса мантийных землетрясений происходит на глубинах 100–300 км, однако отмечены землетрясения и на глубине 700 км. В предлагаемой статье речь идет о прогнозе коровых землетрясений. Вопрос об интервале глубин расположения коровой сейсмичности в земной коре (ее сейсмогенном слое) рассмотрен в следующем параграфе.



Рис. 1. Разлом Сан-Андреас, как гигантский шрам, пересекает равнину Карризо в Калифорнии¹.

Исходя из соображений Г.А. Гамбургцева, изложенных в первой части статьи, есть 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 (рис. 1) 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, составляющей 10 см/год, смещается ложе Тихого океана.

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. Вид возможных вариаций скоростей, при которых в том или ином участке разлома возможно зарождение очага землетрясения определить достаточно просто: 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, то лишь в этом случае возникают условия для накопления в этом участке упругих напряжений – зарождение очага землетрясения.

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.

Среди причин, порождающих концентраторы напряжений в разломе можно назвать следующие: вариации локальных и региональных полей напряжений, изменяющие величину коэффициента тре-

¹ Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974.

ния в разломе¹; влияние температуры и давления; вариации флюидных процессов; 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 объёма 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, благодаря чему 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.

Таким видится путь зарождения и формирования очага корового землетрясения.

Как было отмечено ранее, Г.А. Гамбурцев рассматриваемые консолидированные участки в сейсмогенных разломах очень метко назвал «спайками».

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 объёме горных пород предельных упругих сейсмогенных деформаций.

Таким образом, можно считать, что главным условием зарождения очага корового землетрясения является возникновение концентратора напряжений, препятствующего тектоническим смещениям в месте его образования и приводящее к формированию в той или иной зоне разлома механически прочного, консолидированного объёма горных пород (спайки).

Эта спайка, означающая остановку смещений блоков в том или ином участке разлома при непрекращающемся движении двух протяженных, взаимно смещающихся систем блоков и породит на этом участке 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.

Таким видится путь зарождения и формирования очага корового землетрясения.

Таким образом, очаг в начальной фазе должен представлять тело, преобладающими деформациями которого являются упругие деформации - **это условие является необходимым и достаточным для зарождения и формирования очага сильного землетрясения.**

Следует еще раз подчеркнуть, 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, порождаемой взаимными тектоническими смещениями блоков земной коры, является полная (или частичная) задержка этих смещений блоков в том или ином участке сейсмогенного разлома. Возможен и другой механизм возникновения коровых землетрясений. Это так называемые обвальные землетрясения, которые могут иметь место в зонах растяжения, в зонах раздвига земной коры, например, в Байкальской рифтовой зоне. Однако сведений о сильных коровых землетрясениях пока нет.

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 ученика Г.А. Гамбурцева, члена-корреспондента АН СССР Ю.В. Ризниченко², 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.

¹ Геворкян С.Г. Нелинейный (степенной) закон трения для талых и мёрзлых грунтов [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 4. Вып. 1: Система планета Земля. Режим доступа: <http://e-almanac.space-time.ru/assets/files/Tom%204%20Vip%201/rubr5-st2-gevorkyansg-2013.pdf>; Геворкян С.Г., Калантарова Ж.Х., Голубов Б.Н. Нелинейный закон трения для грунтов // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2006. Т. 81. № 2. С. 36–41.

² Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985.

Сейсмогенный слой земной коры

В свете рассматриваемой проблемы крайне важно знать, сейсмична ли вся толща земной коры или нет, так как на чем меньшей глубине в земной коре расположен очаг готовящегося землетрясения, тем больше вероятность его обнаружения.

В сейсмологии традиционно считают, что коровые землетрясения происходят на глубинах до 70 км. Однако это не соответствует действительности. Как теперь установлено, упругим, способным накапливать значительные упругие деформации и хрупко разрушаться при достижении накопленными упругими напряжениями предела прочности пород, т.е. сейсмогенным слоем, является верхний слой земной коры мощностью от 10 до 25 км¹.

Причина этого явления кроется в реологической неоднородности горных пород земной коры по вертикали. В свете решаемой нами проблемы земную кору в первом приближении можно разделить на два слоя – упругий и пластичный². Как уже было сказано, верхний «холодный» слой земной коры мощностью 10–25 км является упругим сейсмогенным слоем, способным накапливать значительные упругие деформации и хрупко разрушаться при достижении накопленными упругими напряжениями предела прочности пород. Горные породы, слагающие более низкие горизонты литосферы более разогреты, менее прочны (пластичны и вязкопластичны), и поэтому в них не могут формироваться очаги сильных землетрясений. В качестве обоснования этого утверждения приведем имеющиеся теоретические соображения и экспериментальные данные.

Вот что о состоянии пород в верхней части земной коры сообщает английский геофизик М. Ботт:

«Результаты экспериментальных исследований показали, что механические свойства пород на глубине 10–25 км претерпевают два существенных изменения. Во-первых, совершается переход от хрупкого состояния к пластическому; Григгс, Тернер и Хирд ... не наблюдали внезапного появления трещин в любых породах, кроме кварцита, при давлениях выше 5 кбар и температуре выше 500° С, что соответствует условиям на глубине примерно 20 км. Во-вторых, следует ожидать, что предел прочности на сжатие уменьшается с глубиной под преобладающим воздействием температуры; например, предел прочности дунита, пироксенита и гранита при всестороннем сжатии 5 кбар уменьшается от 20 кбар при 25° С до 10 кбар при 500° С и до 7 кбар при 800° С»³.

И далее:

«Есть основания полагать, что нижняя часть коры – при условии достаточно высокой температуры и больших разностей напряжений – может испытывать заметные деформации в виде неустановившейся и установившейся ползучести»⁴.

Разделение в вертикальном разрезе вещества литосферы на слои с различными упругими характеристиками подтверждается так же распределением в ней механической добротности (Q_{μ}). Обратимся к работе В.Н. Жаркова:

«Величину Q_{μ} можно также рассматривать как «меру идеальности» упругости среды. Чем больше значение Q_{μ} , тем меньшая часть механической энергии при колебаниях рассеивается и переходит в тепло, тем ближе среда к идеально упругой»⁵.

И далее:

«Наружный жёсткий слой Земли (её литосфера) разделяется на три зоны: повышенной добротности (0–19 км), $Q_{\mu} \sim 600$; средней добротности (19–38 км) $Q_{\mu} \sim 300$, и пониженной добротности (38–90 км), $Q_{\mu} \sim 150$ »⁶.

Обращает на себя внимание хорошее совпадение между обоснованной Боттом границей перехода пород коры в пластическое состояние на глубине около 20 км и мощностью слоя земной коры с

¹ Каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука. 1977; Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС. 2003; Рогожин Е.А. Идеи академика Г.А. Гамбурцева в области выделения сейсмоактивных районов // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. М.: Янус-К, 2013. С. 263–292.

² Ботт М. Указ. соч.; Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983; Николаевский В.Н. Обзор: земная кора, дилатансия и землетрясения // Новое в зарубежной науке. Механика. Вып. 28. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. С. 133–215; Павленкова Н.И. Сейсмические модели земной коры и верхней мантии и их геологическая интерпретация // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. Т. 2. М.: ГЕОС, 1988. С. 72–75; Тёркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Т. 1–2. М.: Мир, 1985; Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977.

³ Ботт М. Указ. соч. С. 280.

⁴ Там же С. 281.

⁵ Жарков В.Н. Указ. соч. С. 90.

⁶ Там же. С. 92.

наиболее высокой добротностью: 0–19 км. Следует отметить, что это максимальная добротность не только в литосфере, но и мантии Земли (рис. 2).

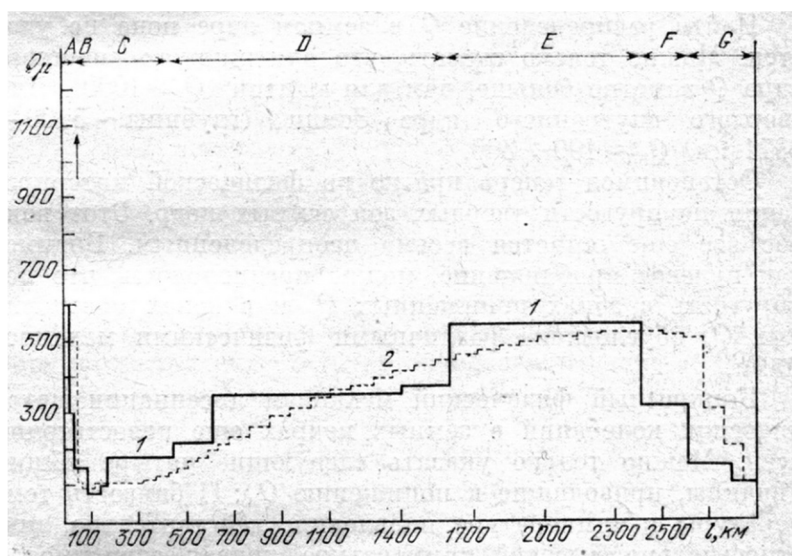


Рис. 2. Распределение механической добротности $Q_{\mu}(l)$ в коре и мантии Земли¹: А (0–38 км) – 1-я зона высоких Q_{μ} (упругая литосфера); В (38–90 км) – неупругая литосфера; С (90–450 км) – 1-я зона низких Q_{μ} ; D (450–1600 км) – 1-я зона промежуточных Q_{μ} ; E (1600–2400 км) – 2-я зона высоких Q_{μ} ; F (2400–2600 км) – 2-я зона промежуточных Q_{μ} ; G (2600–2885 км) – 2-я зона низких Q_{μ} . 1 – модифицированное распределение Q_{μ} , полученное В.М. Дорофеевым и В.Н. Жарковым²; 2 – модель SL83³.

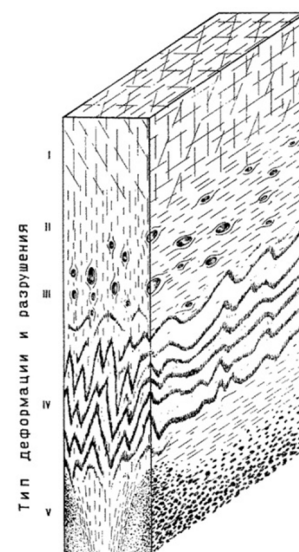


Рис. 3. Схема строения генерального разлома по вертикальному разрезу⁴: I – хрупкое разрушение, II – квазихрупкое разрушение, III – квазипластическое течение, IV – пластическое течение, V – вязкое течение.

В свете рассматриваемой проблемы также крайне интересна представленная на рис. 4 схема строения разлома, предложенная С.И. Шерманом.

По расчётам С.И. Шермана, породы земной коры в разломе сохраняют упругие свойства (в той или иной мере) лишь на трёх первых, показанных на рис. 4 горизонтах (I, II и III). Суммарная мощность этих горизонтов ориентировочно составляет 25 км. В пределах этих 25 км с увеличением глубины имеет место переход от хрупкого разрушения (твёрдое тело Гука) – примерный интервал глубин 0–5 км – к квазихрупкому разрушению (вязкоупругое тело Бюргера) ориентировочно на глубинах 5–10 км и наконец к квазипластическому течению (упруговязкое тело Максвелла) на глубинах около 10–25 км. На больших глубинах (горизонты IV и V) имеют место только пластические деформации: пластическое течение (пластическое тело Сен-Венана) в горизонте IV переходит в вязкое течение (вязкопластическое тело Бингама) в V горизонте.

Разделение земной коры по реологическим параметрам на два слоя, достоверность местонахождения наиболее упругого слоя в самой верхней ее части и

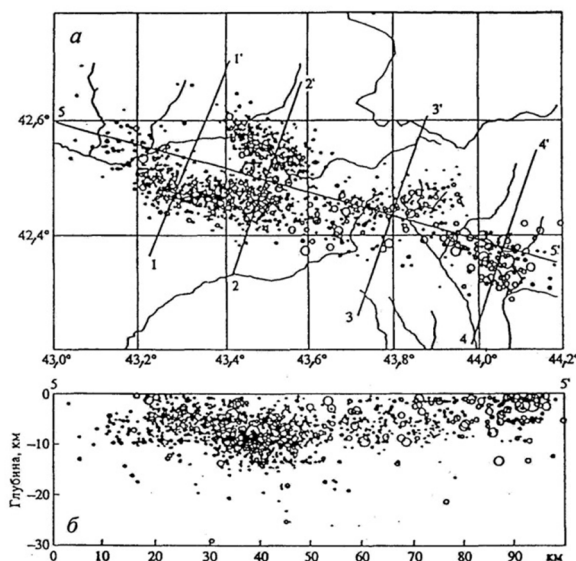


Рис. 4. Карта эпицентров Рачинского землетрясения (а) и вертикальный разрез по линии 5–5' (б)⁵. На секущую плоскость спроецированы все сейсмические события за афтершоковый период. Глубина основного толчка 10 км, длина очага около 100 км, магнитуда 7,3.

¹ Жарков В.Н. Указ. соч.

² Дорофеев В.М., Жарков В.Н. Об определении механической добротности мантии Земли // Известия АН СССР. Физика Земли. 1978. № 9. С. 55–73.

³ Anderson D.L., Hart R.S. "Attenuation Models of the Earth." *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 16 (1978): 789–806.

⁴ Шерман С.И. Указ. соч.

⁵ Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э., Борисов Б.А., Аптектман Ж.Я., Васильев В.Ю., Делицын Л.Л., Романов А.А., Ошер Б.В., Парини И.Е., Афимкина Т.В., Шилова Н.Е., Шумилина Л.С., Джавахишвили З., Систернас А., Эсслер А., Ривера Л., Дорбат Л., Кинг Дж., Фуэнсалида А., Оуэн Л.А., Мас-Кормак Д., Бейкер К., Лангер Ч., Майер-Роза Д., Смит П. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений // Физика Земли. 1993. № 3. С. 12–23.

реальность указанной выше мощности этого слоя подтверждаются и ярко иллюстрируются натурными наблюдениями – данными о распределении глубин афтершоков сильных коровых землетрясений. Афтершоки – это более слабые землетрясения, возникающие в очаговой зоне сильного землетрясения. По существу, афтершоки «доделывают» то, что не сделал основной сейсмический удар – снимают упругие напряжения, оставшиеся в очаге после сильного землетрясения. Следовательно, афтершоки могут происходить лишь в среде, способной накапливать упругие сейсмогенные деформации (напряжения), и поэтому, изучив распределение афтершоков по глубине, можно определить мощность сейсмогенного слоя в исследуемом районе. Типичным примером таких данных является Рачинское землетрясение 1991 г. (рис. 4).

Из рисунка однозначно следует, что после землетрясения упругие напряжения снимались в самой верхней части земной коры: 0–25 км. Однако наиболее однородное поле афтершоков занимает интервал глубин всего лишь от нуля до 10 км. После этой границы, с увеличением глубины, число афтершоков резко сокращается и на максимальной глубине (25 км) зафиксированы лишь единичные афтершоки. Такое распределение афтершоков дает основания полагать, что именно этот слой земной коры ответственен за коровую сейсмичность, т.е. именно он и является сейсмогенным.

Так можно полагать, что в рассматриваемом районе мощность сейсмогенного слоя составляет 10–15 км. С полным основанием можно считать, что подобные исследования афтершоков являются наиболее надежным методом определения мощности сейсмогенного слоя в тех районах, где имеющаяся сеть сейсмических станций не позволяет фиксировать слабые землетрясения и определять глубины гипоцентров землетрясений с достаточной точностью – в пределах 1–5 км.

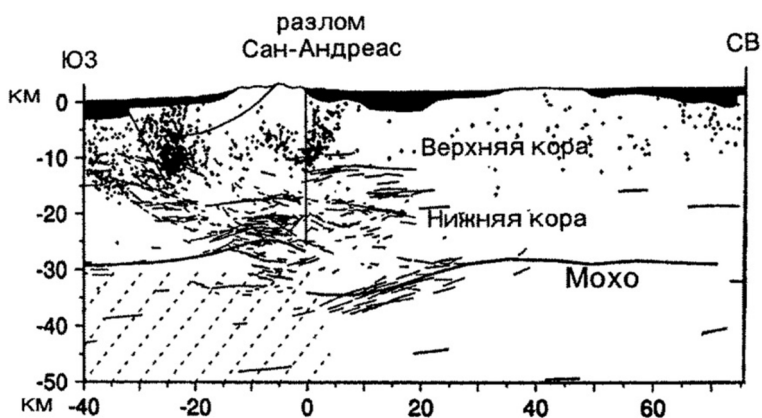


Рис. 5. Сейсмический профиль в районе Лос-Анджелеса¹: толстые линии – Мохо и другие поверхности раздела, тонкие линии – рефлекторы; диагональная штриховка – аномально высокоскоростная верхняя мантия по данным сейсмической томографии; точки – гипоцентры землетрясений за период с 1981 по 1998 гг.

соображения, так и экспериментальные лабораторные исследования, а также натурные сейсмологические наблюдения убедительно говорят о том, что мощность сейсмогенного слоя земной коры действительно составляет 10–25 км, что сейсмогенные, упругие напряжения накапливаются во всей толще этого слоя и что **именно в сейсмогенном слое зарождаются, созревают и реализуются очаги коровых землетрясений.**

Ошибочные представления о сейсмичности всей толщи земной коры скорее всего возникли из-за значительных ошибок (до десятков километров) определения глубины гипоцентров землетрясений. Причиной этих ошибок является редкая сеть сейсмических станций: чем больше расстояния сейсмических станций от эпицентра землетрясения, с тем большей ошибкой определяется глубина гипоцентра.

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

Высказанные соображения о мощности сейсмогенного слоя земной коры подтверждаются также натурными сейсмологическими наблюдениями на разломе Сан-Андреас в Калифорнии, где, как известно, создана и функционирует очень густая сеть сейсмических станций, позволяющая фиксировать даже очень слабые землетрясения и определять с высокой точностью глубины гипоцентров всех местных землетрясений. Некоторые результаты таких наблюдений продемонстрированы на рис. 5. Представленные на этом рисунке данные убедительно говорят о том, что разлом Сан-Андреас сейсмичен лишь до глубины 15 км.

Таким образом, как теоретиче-

¹ Короновский Н.В., Ломизе М.Г. Концепция глубинных разломов в тектонике плит // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С. 344–373.

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)².

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 породить **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. 6).

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. Этот факт убедительно говорит о том, что порождаемые при сильных землетрясениях смещения геодезических пунктов несут информацию о едином механизме подготовки этих землетрясений. Крайне важно и то, что этот механизм един для разных континентов. Можно полагать, он является универсальным, но это требует тщательной проверки.

Причина появления указанной закономерности смещений пунктов на рис. 7А 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 упруго напряжены (упругий изгиб): кривая **ab**. Момент t_2 – положение горных пород после землетрясе-

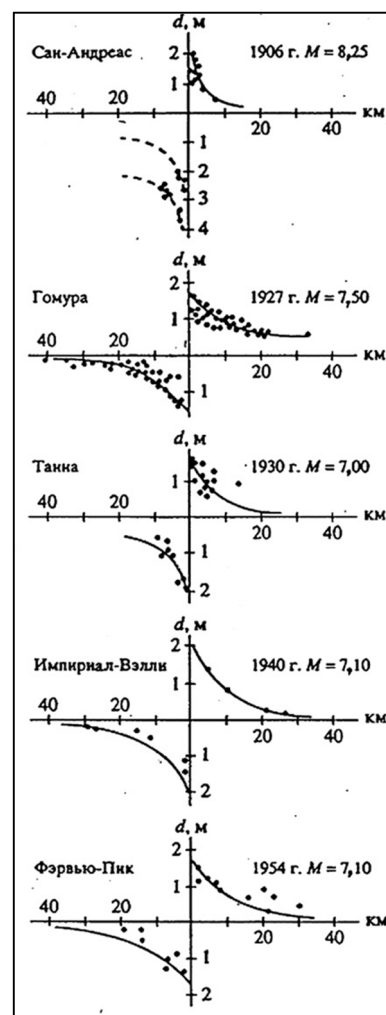


Рис. 6. Реальное распределение смещений пунктов триангуляции (d) в зонах сейсмогенных разломов при сильных коровых землетрясениях в зависимости от удаления геодезических пунктов от разломов¹.

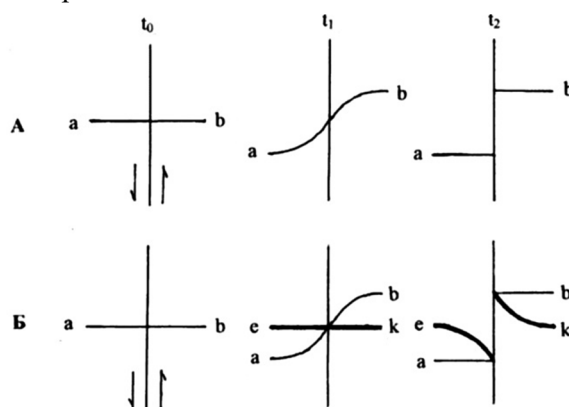


Рис. 7. Объяснение явления экспоненциального распределения смещений геодезических пунктов в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений.

¹ Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985.

² Безухов Н.И., Лукин О.В. Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. М.: Высшая школа, 1974. С. 6.

ния, 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. 7Б, который отличается от рис. 7А 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 над уже деформированными упругим изгибом горными породами готовящегося очага землетрясения. И, следовательно, при сбросе упругих напряжений горные породы сместились по разлому и при этом выпрямились, а прямолинейный геодезический профиль над очагом наоборот превратился в два изогнутых отрезка, сохранивших кривизну кривой **ab**. 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 изогнутых отрезках сохранилась информация о величине упругих деформаций, накопленных в очаге к моменту создания этого геодезического профиля.

Из анализа рис. 6 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.

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 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. 6, эти расстояния измеряются несколькими десятками километров: от 40 до 60.

О возможностях геодезии в осуществлении прогноза коровых 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

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

1. Коровая сейсмичность обусловлена нарушением режима тектонических смещений – их задержкой 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

$$d = Ae^{\alpha x},$$

где d – величина упругого смещения рассматриваемой точки земной поверхности, x – удаление этой точки от разлома, A – величина максимального смещения бортов разлома при землетрясении, α – интегральная характеристика упругих свойств горных пород в очаге землетрясения.

4. Земная поверхность над очагом готовящегося землетрясения, являющаяся верхней границей сейсмогенного слоя земной коры, участвует в процессе подготовки этого очага.

5. При подготовке землетрясения упругие деформации проникают в тела контактирую-

щих по разлому блоков на 20–30 км, т.е. полная ширина очага сильного землетрясения составляет 40–60 км.

б. Отслеживать процесс подготовки очага землетрясения, т.е. достоверно определять вид упругой кривой на таких базах (десятки километров) возможно **лишь геодезическим методом**¹.

Эти выводы позволяют сделать обоснованное заключение о том, что изучение деформаций земной поверхности геодезическими методами позволяет осуществлять точный прогноз места очага готовящегося землетрясения, а также определять максимальную силу, которую он способен породить.

О прогнозе места землетрясения. Для реализации этого прогноза необходимо на выбранном, по тем или иным соображениям, участке сейсмогенной зоны создать геодезическое построение, позволяющее с необходимой точностью определять вид деформаций земной поверхности на исследуемом участке, т.е. достоверно устанавливать вид упругого изгиба горных пород в случае, если на этом участке идет процесс подготовки очага землетрясения.

Таким образом, анализ результатов геодезических исследований с полной определенностью показал, что геодезическим методом можно решением прямой задачи осуществлять точный прогноз места готовящегося очага землетрясения. Это возможно с помощью специальных геодезических построений, конструкции которых детально описаны в нашей работе 2003 г.².

О прогнозе силы землетрясения. Однако возможности геодезического метода не ограничиваются только прогнозом места готовящегося очага землетрясения: он позволяет также осуществлять прогноз силы землетрясения, которую может породить этот очаг. Эту возможность предвидел Г.А. Гамбурцев. Здесь уместно вернуться к ранее изложенным его соображениям по этой проблеме:

«Так как напряжения разрыва не могут меняться в очень широких пределах, то отсюда следует, что энергия землетрясения в основном определяется не напряжением, а размерами очага, т.е. размерами той области, внутри которой в результате землетрясения исчезают сдвиговые напряжения»³.

Функциональную зависимость между силой землетрясения - магнитудой M и длиной очага L установил Ю.В. Ризниченко⁴. Эти данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость силы землетрясения (M) от длины очага (L) и подвижки в очаге (D)
Триангуляции при землетрясении объясняются на рис. 6.

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, знание длины очага готовящегося землетрясения L позволит предсказать и максимальную силу землетрясения (магнитуду M), которую может породить зреющий очаг. Совершенно очевидно, что это достижимо геодезическим методом. Для решения этой проблемы необходимо и достаточно определить длину упруго деформированного участка земной поверхности над обнаруженным ранее очагом зреющего землетрясения. Вопрос о виде геодезических построений, необходимых для определения размеров готовящегося очага землетрясений, рассмотрен в нашей более ранней работе⁵.

Что касается величины D в таблице 1, то поскольку основной сброс накопленных упругих напряжений происходит при основном (магистральном) разрыве горных пород в очаге, определенную сейсмологическим методом величину подвижки бортов разлома при землетрясении (D) можно считать численно равной максимальному сейсмогенному упругому смещению, накопленному в очаге к моменту землетрясения.

¹ Певнев А.К. Указ. соч.

² Там же.

³ Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений // Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 427.

⁴ Ризниченко Ю.В. Указ. соч.

⁵ Певнев А.К. Указ. соч.

О прогнозе времени землетрясения. В отличие от прогнозов места и силы коровых землетрясений, которые можно осуществлять решением прямых задач, для прогноза времени это невозможно, так как нам неизвестны законы разрушения горных пород в реальных природных условиях. Поэтому исследования, нацеленные на прогноз времени, нужно начинать с изучения этих закономерностей. А так как в настоящее время мы не можем назвать ни один из методов, с помощью которого можно было бы изучить 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 геофизических и других полях тонкой структуры процесса разрушения горных пород в сейсмогенном слое земной коры. Конечно создавать такие системы на значительных площадях практически невозможно, но здесь на помощь приходит геодезический метод, который позволяет осуществлять заблаговременное обнаружение зреющего очага землетрясения. Благодаря этому открывается реальная возможность создавать кондиционные системы комплексных наблюдений и проводить на них соответствующие решаемой задаче комплексные исследования не в случайно или недостаточно обосновано выбранных местах, а непосредственно над готовящимся очагом землетрясения.

Крайне важно то, что лишь при такой системе исследований возможна регистрация 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 достаточным объективным показателем приближающейся катастрофы и позволит своевременно принять необходимые меры безопасности. В подтверждение такому заключению сошлёмся на следующее высказывание Г.А. Гамбурцева:

«Большинство из предвестников землетрясений, по всей видимости, будет проявляться лишь в эпицентральной области землетрясения; поэтому они будут наблюдаться очень редко»¹.

Есть все основания считать, что такой подход может открыть путь к точному прогнозу времени главных сейсмических событий в созревшем и начавшем разрушаться очаге землетрясения.

В прогнозе времени Г.А. Гамбурцев большие надежды возлагал на механические предвестники. Он писал:

«Изыскание методов прогноза времени землетрясений следует направить в первую очередь в сторону поиска механических предвестников землетрясений. Такие поиски могут быть успешными только в том случае, если они будут основываться на глубоком изучении всех деталей механизма быстрых и медленных движений блоков земной коры сейсмоактивных районов»².

С учетом этих соображений Г.А. Гамбурцева мы имеем полное основание говорить о том, что перечень методов для прогноза времени должен начинаться с методов наблюдений за полями смещений и деформаций в непрерывном режиме (сейсмологические, наклономерные, деформографические и специальные геодезические измерения в основном с использованием космических методов геодезии).

Таким образом, наиболее перспективной можно считать следующую стратегию прогнозных исследований. На выбранных по тем или иным практическим или научным соображениям участках сейсмогенных зон создаются геодезические прогнозные сети, способные решать задачу прогнозов места и силы землетрясения. Затем в местах готовящихся очагов организуются нацеленные на прогноз времени наблюдательные сети комплексных исследований. Приступив к практической реализации предлагаемой стратегии прогноза, мы восстановим историческую справедливость по отношению к патриарху проблемы прогноза землетрясений в нашей стране – Григорию Александровичу Гамбурцеву.

При рассмотрении проблемы прогноза землетрясений крайне важно иметь в виду следующее обстоятельство. Смещения и деформации земной коры происходят не только под действием устойчивых во времени долгоживущих эндогенных (внутренних) процессов, но также и в результате воздействия на Землю различных экзогенных (внешних) процессов, среди которых, определяющими можно считать космические. Так, например, Землю периодически упруго деформируют лунно-солнечные приливы и вариации скорости ее вращения. При рассмотрении этой проблемы целесообразно со-

¹ Гамбурцев Г.А. Указ. соч. С. 433.

² Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. К 80-летию со дня рождения академика Григория Александровича Гамбурцева. М.: Наука, 1982. С. 306.

слаться на следующие соображения А.Г. Гамбурцева:

«Среди природных воздействий большую роль играют воздействия ритмические. Существует множество подобных воздействий в широчайшем диапазоне периодов – от секунд до сотен миллионов лет. Но ритмы эти не постоянны – они меняют периодичность, исчезают и появляются вновь, изменяя тем самым свойства литосферы»¹.

Если иметь в виду прогноз землетрясений, то можно полагать, что пока готовящийся очаг корового землетрясения находится в устойчивом состоянии такие изменения свойств литосферы (земная кора является ее верхней частью) не окажут существенного влияния на процесс формирования очага. Скорее всего они могут либо несколько ускорить этот процесс, либо его замедлить. Однако они могут оказать существенное воздействие на очаг, находящийся в состоянии неустойчивого равновесия, т.е. когда в очаге накоплены предельные упругие напряжения. В этом случае даже слабое дополнительное воздействие на него может сыграть роль спускового механизма (триггерный эффект) и спровоцировать преждевременное землетрясение.

С рассмотренных позиций отслеживание указанных вариаций свойств литосферы не только целесообразно, но и крайне необходимо. Разумная схема таких исследований предложена А.Г. Гамбурцевым.

«Исходя из изложенного, можно наметить следующую последовательность действий: 1) режимные наблюдения процессов, происходящих в природных и природно-техногенных системах; 2) выявление закономерностей и критических уровней состояния среды, за которыми следуют катастрофы; 3) прогнозирование будущих состояний изучаемой среды (объектов); 4) составление режимов природопользования, учитывающих природные вариации состояния среды (возможно, также и некоторые уже существующие техногенные воздействия). В эту последовательность может быть включено звено, предусматривающее принятие специальных мер по предупреждению негативных экологических последствий»².

Заканчивая рассмотрение вопроса о прогнозе времени землетрясения, следует остановиться на следующих двух аспектах. Во-первых, на существенной практической значимости заблаговременного, за многие годы и десятки лет, прогноза места и силы зреющего очага землетрясения. Ведь в этом случае появится реальная возможность своевременно осуществить в потенциально опасной зоне все необходимые мероприятия для сведения к минимуму любого ущерба от будущего землетрясения. Это уже во власти людей и поэтому будет определяться мерой их рациональности и гуманных принципов.

Во-вторых, точное знание местонахождения и размеров зреющего очага землетрясения позволит приступить к опробованию методов искусственного воздействия на этот очаг с целью безопасного снятия накапливаемых в нем сейсмогенных напряжений. На современном научном и техническом уровнях знаний это вполне реально и если предлагаемая концепция прогноза получит практическое осуществление в недалеком будущем, то мы имеем все шансы быть свидетелями безопасной разрядки очагов землетрясений.

В-третьих, рассматривая проблему прогноза землетрясений крайне важно иметь в виду следующее обстоятельство. Смещения и деформации земной коры происходят не только под действием устойчивых во времени долгоживущих эндогенных (внутренних) процессов, но также и в результате воздействия на Землю различных экзогенных (внешних) процессов, среди которых, определяющими можно считать космические. Так, например, Землю периодически упруго деформируют лунно-солнечные приливы и вариации скорости ее вращения. Если иметь в виду прогноз землетрясений, то можно полагать, что до тех пор, пока готовящийся очаг корового землетрясения находится в устойчивом состоянии, такие изменения свойств литосферы (земная кора является ее верхней частью) не окажут существенного влияния на процесс формирования очага. Скорее всего они могут либо несколько ускорить этот процесс, либо его замедлить. Однако они могут оказать существенное воздействие на очаг, находящийся в состоянии неустойчивого равновесия, т.е. когда в очаге накоплены предельные упругие напряжения. В этом случае даже слабое дополнительное воздействие на него может сыграть роль спускового механизма (триггерный эффект) и спровоцировать преждевременное землетрясение.

Заключение

Искреннее восхищение вызывает то, что много десятилетий тому назад, впервые занявшись проблемой прогноза землетрясений, Григорий Александрович Гамбурцев наметил единственно правильный подход к ее решению. Можно не сомневаться, что, если бы не ранняя трагическая смерть

¹ Гамбурцев А.Г. Современная геодинамика и катастрофы // Вестник российской академии наук. 1995. Т. 65. № 7. С. 646.

² Там же. С. 651.

Г.А. Гамбурцева, вместо современного кризиса в решении проблемы прогноза землетрясений мы были бы далеко впереди на пути ее решения.

Использование геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений позволяет осуществлять точный прогноз места и силы готовящегося землетрясения, что, конечно же, ускорит решение проблемы прогноза времени землетрясения.

Следует отметить, что первая геодезическая прогнозная система, рассчитанная на прогноз места и силы корового землетрясения, была создана в 2011 г. в Мексике в Штате Нижняя Калифорния на сейсмогенном разломе Империял (южное продолжение разлома Сан-Андреас). Система расположена вблизи столицы Штата города Михикали, пережившим сильное землетрясение в 2010 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аптикаева О.И. О связи сейсмической активности с особенностями строения земной коры и верхней мантии Гармского прогнозического полигона // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. М.: Янус-К, 2013. С. 293–313.
2. Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э., Борисов Б.А., Аптекман Ж.Я., Васильев В.Ю., Делицын Л.Л., Романов А.А., Ошер Б.В., Парини И.Е., Афимкина Т.В., Шилова Н.Е., Шумилина Л.С., Джавахишвили З., Систернас А., Эсслер А., Ривера Л., Дорбат Л., Кинг Дж., Фуэнсалида А., Оуэн Л.А., Мас-Кормак Д., Бейкер К., Лангер Ч., Майер-Роза Д., Смит П. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений // Физика Земли. 1993. № 3. С. 12–23.
3. Безухов Н.И., Лужин О.В. Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. М.: Высшая школа, 1974. 200 с.
4. Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 375 с.
5. Гамбурцев А.Г. Современная геодинамика и катастрофы // Вестник российской академии наук. 1995. Т. 65. № 7. С. 646–655.
6. Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений // Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 427–435.
7. Геворкян С.Г. Нелинейный (степенной) закон трения для талых и мёрзлых грунтов [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 4. Вып. 1: Система планета Земля. Режим доступа: <http://e-almanac.space-time.ru/assets/files/Tom%204%20Vip%201/rubr5-st2-gevorkyansg-2013.pdf>
8. Геворкян С.Г., Калантарова Ж.Х., Голубов Б.Н. Нелинейный закон трения для грунтов // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2006. Т. 81. № 2. С. 36–41.
9. Дорофеев В.М., Жарков В.Н. Об определении механической добротности мантии Земли // Известия АН СССР. Физика Земли. 1978. № 9. С. 55–73.
10. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 415 с.
11. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
12. Каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука. 1977. 535 с.
13. Короновский Н.В., Ломизе М.Г. Концепция глубинных разломов в тектонике плит // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С. 344–373.
14. Красовский Ф.Н. О некоторых научных задачах астрономо-геодезии в связи с изучением строения твердой оболочки Земли // Избр. соч. Т. 1. М.: Геодезиздат, 1953. С. 251–269.
15. Николаевский В.Н. Обзор: земная кора, дилатансия и землетрясения // Новое в зарубежной науке. Механика. Вып. 28. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. С. 133–215.
16. Павленкова Н.И. Сейсмические модели земной коры и верхней мантии и их геологическая интерпретация // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. Т. 2. М.: ГЕОС, 1988. С. 72–75.
17. Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС. 2003. 153 с.
18. Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. К 80-летию со дня рождения академика Григория Александровича Гамбурцева. М.: Наука, 1982. 320 с.
19. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.
20. Рогожин Е.А. Идеи академика Г.А. Гамбурцева в области выделения сейсмоактивных районов // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. М.: Янус-К, 2013. С. 263–292.
21. Тёркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Т. 1–2. М.: Мир, 1985. 730 с.
22. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.
23. Anderson D.L., Hart R.S. "Attenuation Models of the Earth." *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 16 (1978): 789–806.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Певнев, А. К. Прогноз землетрясений возможен. (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Часть 2. Возвращение к Г.А. Гамбурцеву: деформационная модель подготовки очага корового землетрясения / А.К. Певнев // Пространство и Время. — 2016. — № 1—2(23—24). — С. 227—238. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provrg_stl_2-23_24.2016.91.