

УДК 550.343

DOI: [10.46698/VNC.2020.25.51.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.25.51.006)

Оригинальная статья

Чрез тернии – к прогнозу землетрясений

А. К. Певнев 

ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995,
г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, e-mail: an. pevnev@yandex. ru

Статья поступила: 25.04.2020, доработана: 11.06.2020, одобрена в печать: 13.06.2020

Резюме: Актуальность работы. Изучение землетрясений является важнейшей задачей по обеспечению безопасности человеческих жизней в условиях городской территории. Обоснованный прогноз сильных землетрясений представляет большой научный и практический интерес. **Цель работы.** В статье приводятся результаты анализа ситуации, сложившейся в сейсмологии в свете трудов Г. А. Гамбургера, выдающегося российского сейсмолога и геофизика. Начатые им многие весьма перспективные исследования остались незавершенными. Он показал, что очаги происходящих в земной коре землетрясений зарождаются, созревают и разрушаются в зонах тектонических сейсмогенных разломов земной коры и, что эти процессы можно отслеживать непосредственно на земной поверхности, изучая деформации земной коры. К сожалению, развитие сейсмологической науки пошло другим путем. **Методы исследования.** В статье поэтапно рассматривается история развития методологии прогноза землетрясений. **Результаты работы.** Показано, что решение проблемы прогноза методом решения обратных задач или распознаванием образа по набору аномалий в различных геофизических и других полях себя, в целом, не оправдало. Надежных причинно-следственных связей между процессами в очагах землетрясений и аномалиями в различных полях, не обнаружили. Однако сторонники «стратегии аномалий» нашли другое объяснение полученному результату исследований: причинно-следственная связь имеет место, но порождаемые очагом землетрясения аномалии очень малы, и их можно обнаруживать лишь с помощью достаточно густых наблюдательных сетей, способных улавливать эти аномалии. Идея густых сетей была реализована на разломе Сан-Андреас в Калифорнии, но подтверждения она не получила. Решение проблемы прогноза землетрясений возможно только тогда, когда будут начаты исследования, направленные на обнаружение прямых указателей того, что в данном конкретном объеме горных пород идет процесс накопления упругих сейсмогенных деформаций. Начинать прогноз землетрясения необходимо с обнаружения места расположения формирующегося очага. Для прогнозирования места очага землетрясения хватает одного прогнозного профиля. Для прогноза силы землетрясения необходимы несколько профилей. Проблема же прогноза времени землетрясения требует комплексного решения, так как для этого необходимо изучение закономерностей разрушения очагов землетрясений с использованием геодезических, сейсмологических и других методов.

Ключевые слова: прогноз, очаг землетрясения, время землетрясения, геодезический мониторинг.

Для цитирования: Певнев А. К. Чрез тернии – к прогнозу землетрясений. *Геология и Геофизика Юга России*. 2020. 10 (2): 82-94. DOI: [10.46698/VNC.2020.25.51.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.25.51.006)

GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2020.25.51.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.25.51.006)

Original paper

Through difficulties to the earthquake prediction

A. K. Pevnev 

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, 10/1 Bolshaya Gruzinskaya Str.,
Moscow 123995, Russia, e-mail: an. pevnev@yandex. ru

Received: 25.04.2020, revised: 11.06.2020, accepted: 13.06.2020

Abstract: Relevance. The study of earthquakes is the most important task for ensuring the human life safety in urban areas. A reasonable prediction of strong earthquakes is of great scientific and practical interest. **Aim.** The article presents the results of the analysis of the situation in seismology in the light of the works of G. A. Gamburtsev, who was an outstanding Russian seismologist and geophysicist. Many of his very promising studies remained incomplete. He showed that the foci of earthquakes, occurring in the earth's crust, originate, accumulate and collapse in the zones of tectonic seismogenic faults in the earth's crust; he also showed that these processes can be monitored directly on the ground surface, studying the deformations of the earth's crust. Unfortunately, the development of seismological science went in a different way. **Methods.** The article considers the history of the development of earthquake prediction methodology in stages. **Results.** The article shows that the prediction problem solution by solving inverse problems or by recognizing an image, according to the set of anomalies in various geophysical and other fields, did not prove its value in general. Reliable cause-and-effect relationships between processes in the earthquake focus and anomalies in various fields were not found. However, supporters of the "anomaly strategy" found another explanation for the research result: a cause-and-effect relationship takes place, but the anomalies generated by the earthquake source are very weak, and they can only be detected using sufficiently dense observational networks capable of capturing these anomalies. The idea of dense networks was implemented at the San Andreas Fault in California, but it was not confirmed. The solution of the earthquake prediction problem is possible only in case of the start of the research aimed at the detecting direct indications that an accumulation of elastic seismogenic deformations are taking place in this particular rock volume. It is necessary to begin the earthquake prediction by detecting the location of the generating focus. One forecast profile is enough to predict the location of the earthquake source. And for the prediction of an earthquake intensity, several profiles are necessary. The problem of the time of an earthquake forecast requires a comprehensive solution, since it is obligatory to study the laws of seismic source destruction with the help of geodetic, seismological and other methods.

Keywords: forecast/prediction, earthquake focus, time of earthquake, geodetic monitoring.

For citation: Pevnev A. K. Through difficulties to the earthquake prediction. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2020. 10 (2): 82-94. DOI: 10.46698/VNC.2020.25.51.006.

Введение

Сильные землетрясения являются одним самых опасных природных событий на Земле. Это, во многом, обусловлено их неожиданностью и опасными вторичными природно-техногенными проявлениями и, наконец, тяжелыми социально-экономическими последствиями. В феврале 1975 г. китайскими учеными по целому ряду признаков – предвестников было успешно предсказано землетрясение в Хайчэне с магнитудой $M=7,34$ февраля 1975 года в режиме краткосрочного прогноза (за несколько дней) и большое число жизней было спасено. Научное сообщество приняло близко эту, несомненно, выдающуюся победу. К сожалению, там же в Китае неожиданно, в первую очередь, для ученых произошло землетрясение в Тан-

шане 28 июля 1976 года, в результате которого погибли сотни тысяч людей. Это обстоятельство обусловило резкое изменение отношения к возможности прогноза сильных землетрясений вообще. Проблема краткосрочного прогноза была из приоритетных проблем «переведена» во вспомогательные, точнее, не публичные проблемы. Ученые в России и за рубежом большее внимание стали уделять решению более легко достижимых задач, в частности, среднесрочному и долгосрочному прогнозу землетрясений (карты сейсмического районирования). Примеры подобного успешного среднесрочного прогноза сильного Тбилисского землетрясения 25 апреля 2002 г., носящего служебный характер, известны [Гогмачадзе и др., 2007; Заалишвили, 2009]. За прошедшие 15 лет в сейсмологии много нового было получено и выявлено. Научный интерес к проблеме прогноза вновь возвращается. Именно этим обстоятельством объясняется большое внимание к этой проблеме за рубежом [Cattania et al., 2018; Cocco et al., 2010; Field et al., 2014; Helmstetter et al., 2006, 2007; Jordan et al., 2014; Lombardi, 2019; Mancini et al., 2019; Marzocchi et al., 2017; Rhoades et al., 2011; Segou et al., 2013; Tapia-Hernandez et al., 2019; Toda et al., 2005; Zechar et al., 2010; Werner et al., 2011]. Возможность предсказывать землетрясения является древнейшей мечтой Человечества. Но, к сожалению, до недавнего времени даже причины сейсмической активности Земли оставались тайной за семью печатями – не было ясных представлений о том, что порождает эту беду. Только во второй половине 19-го века многими учеными было признано, что наиболее вероятной причиной являются эндогенные тектонические процессы, которые раздробили земную кору на блоки, перемещающиеся относительно друг друга по разделяющим их разломам земной коры. Но для прогноза землетрясений этого было мало: нужно было определить механизмы зарождения, формирования и разрушения очагов землетрясений.

Эта проблема была теоретически решена только в первой половине 20-го столетия. Теоретическое обоснование этих механизмов было предложено бывшим директором Геофизического института АН СССР академиком Г.А. Гамбургцевым, который после катастрофического Ашхабадского землетрясения 1948 г. возглавил исследования по проблеме прогноза землетрясений в СССР, выполнявшиеся по постановлению Правительства.

Актуальность и цель работы

Григорий Александрович разработал столь научно обоснованную программу исследований по этой проблеме, что она актуальна и по сей день. Он доказал, что очаги происходящих в земной коре землетрясений зарождаются, созревают и разрушаются в зонах тектонических сейсмогенных разломов земной коры и что эти процессы можно отслеживать непосредственно на земной поверхности, изучая деформации земной коры в этих зонах. Он даже успел приступить к практической реализации этих идей на Гармском полигоне, но, к сожалению, Провидение отпустило ему для этого лишь несколько лет – он умер в 1955 году и сразу после этого начатые им многообещающие исследования были прекращены.

Причина прекращения этих исследований легко угадывается из приведенных ниже соображений бывшего директора ИФЗ АН СССР академика М.А. Садовского: «Для меня настоящая сессия в известном смысле юбилейная. 10 лет тому назад мне пришлось добиваться возобновления работ по прогнозу землетрясений и восстановления её в плане научно-исследовательских работ Института физики

Земли АН СССР. Многим из присутствующих, вероятно, неизвестно, что работы по этой проблеме, проводимые акад. Г. А. Гамбурцевым сразу после Ашхабадского землетрясения, в начале шестидесятых годов были прекращены. В одном из выступлений М. В. Келдыша (на тот период Президент АН СССР.) проблема прогноза землетрясений фигурировала как пример необоснованности и фантастичности некоторых тем АН СССР, что отражало мнение отдельных сейсмологов института...» [Садовский, 1976, с. 9].

Может быть эти «некоторые сейсмологи нашего института» понимали, что сейсмологии решение проблемы прогноза землетрясений не под силу, а в другие пути решения этой проблемы не верили?

Да, конечно, через несколько лет в Институте физики Земли АН СССР все же приступили к решению проблемы, но не гамбурцевским, а совершенно иным путем – методом решения обратных задач – распознавание образа по набору аномалий в различных геофизических и других полях, в том числе и фантастических: например, отслеживая поведение, каких то рыбок. Определяющей идеей в этих исследованиях было предположение, что коровая сейсмичность обусловлена региональными полями напряжений. На эти длительные исследования были затрачены значительные интеллектуальные и финансовые ресурсы, но результат оказался плачевным, так как причинно-следственных связей между процессами в очагах землетрясений и аномалиями в различных полях не обнаружили.

Однако сторонники «стратегии аномалий» нашли другое объяснение полученному результату исследований: причинно-следственная связь имеет место, но порождаемые очагом землетрясения аномалии очень малы, и их можно обнаруживать лишь с помощью достаточно густых наблюдательных сетей, способных улавливать эти аномалии.

Идея густых сетей была реализована на разломе Сан-Андреас в Калифорнии, но подтверждения она не получила. Вот как оценил эту идею бывший директор «Института теории прогноза землетрясений АН СССР» академик В. И. Кейлис-Борок: «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].

Методика

Здесь уместно сослаться на соображения некоторых известных ученых о несостоятельности «гипотезы аномалий». Вот как оценил новую стратегию решения проблемы прогноза землетрясений известный сейсмолог О. Н. 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].

А вот соображения коллектива сейсмологов ИФЗ РАН: «Считается, что характеристики среды должны изменяться на различных стадиях «подготовки» сильного землетрясения, что в свою очередь может найти отражение в изменениях наблюдаемых геофизических величин. Попытки отождествления этих вариаций с «аномалиями», предвещающими возникновение сильного землетрясения, и составляют, согласно традиционной методологии, суть поиска предвестников землетрясений. При этом молчаливо предполагается существование детерминированной причинно-следственной связи между указанными явлениями... Необходимость поиска новых подходов продиктована тем кризисом, в котором оказалась современная геофизика на пути решения проблемы прогноза землетрясений» [Кондратьев, 1995, с. 7]. Развернутую оценку существующей методологии прогноза землетрясений дал бывший директор Института физики Земли АН СССР академик В. Н. Страхов: «Попытки решения проблемы путем увеличения числа измеряемых параметров и длительности получаемых временных рядов, составляющих основу материала «обучения», не привели к желаемому результату. Следует признать, что современная экспериментальная геофизика переживает определенный кризис в этой фундаментальной проблеме, суть которого состоит в том, что одно лишь наращивание экспериментальных данных не способствует прогрессу в области прогноза сильных сейсмических событий. Напротив, по мере появления все более протяженных рядов геофизических данных все очевидней становится проблематичность основного положения идеологии прогноза землетрясений – существования детерминированной причинно-следственной связи между экспериментально наблюдаемыми «аномальными» вариациями геофизических полей и возникновением сильных сейсмических событий, что заставляет признать неэффективность существующей методологии прогноза землетрясений» [Кондратьев, 1995, с. 5].

Итак, идея обнаружения очагов землетрясений не оправдала себя: проблема прогноза землетрясений оказалась в тупике. Вполне естественно возникло обоснованное предположение, что выявленное отсутствие причинно-следственных связей свидетельствует о том, что очаги коровых землетрясений создаются не региональными, а локальными полями напряжений и, следовательно, очаговые процессы проявляются только в самом очаге и поэтому их можно обнаружить, занимаясь исследованиями непосредственно в зонах сейсмогенных разломов. А именно это и было предложено Г. А. Гамбурцевым и именно это побудило вернуться к его идеям с привлечением новых данных о закономерностях деформаций земной коры в эпицентральных (очаговых) зонах произошедших сильных землетрясений, определенным методом повторных геодезических измерений (рис. 1).

На рисунке 1 представлены данные повторных триангуляций, выполненных в эпицентральных зонах после случившихся сильных землетрясений. Вертикальные линии – сейсмогенные разломы, по которым произошли горизонтальные подвижки при землетрясениях. Зафиксированные смещения пунктов триангуляции показаны точками; масштаб смещений показан на вертикальной оси, на оси абсцисс отложены расстояния этих пунктов от разлома.

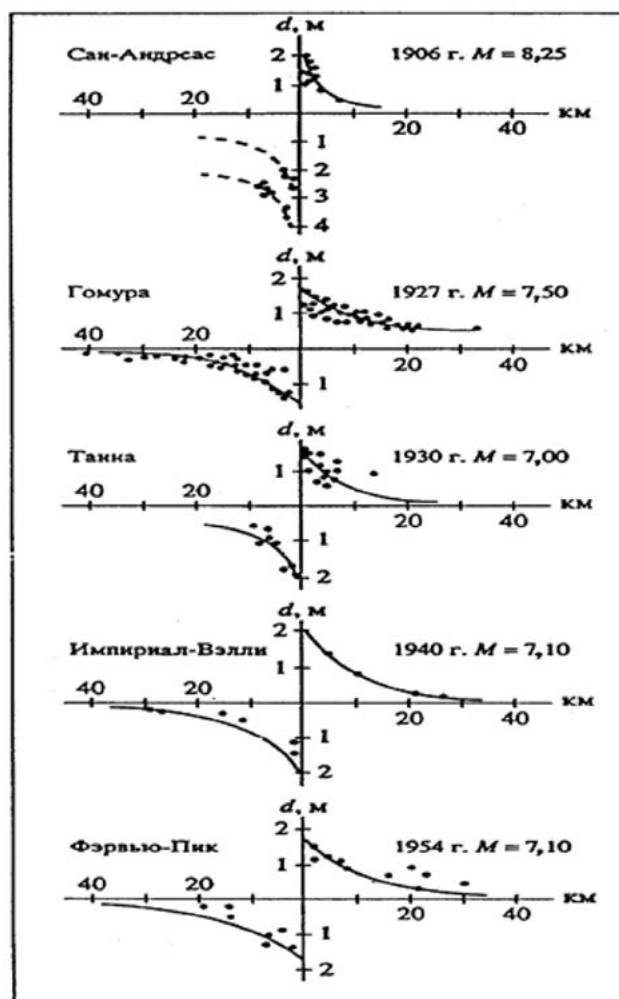


Рис. 1. Реальное распределение смещений пунктов триангуляции (d) в зонах сейсмогенных разломов при сильных коровых землетрясениях в зависимости от удаления геодезических пунктов от разломов, по: [Kasahara, 1985]. /

Fig. 1. Actual distribution of displacements of triangulation points (d) in zones of seismogenic faults during strong crustal earthquakes depending on the distance of geodetic points from faults, according to: [Kasahara, 1985].

На рисунке 1 обращает на себя внимание в первую очередь то, что для всех пяти приведенных землетрясений прослеживается одна и та же закономерность – смещения максимальны вблизи разлома и очень быстро (экспоненциально) убывают с удалением от него. Для разных землетрясений эти смещения становятся минимальными (нулевыми) на расстояниях от 20 до 40 км от разлома. Это дает основание полагать, что экспоненциальное распределение смещений геодезических пунктов на кривых линиях рисунка 1, а также проявление этих смещений не далее 40 км от разлома отражают действительный вид полей напряжений и их размеры – локальных полей напряжений экспоненциального вида породивших эти землетрясения. Справедливость этого предположения обоснована ниже (рис. 2).

Эти данные так же убедительно говорят о том, что порождаемые при сильных землетрясениях смещения геодезических пунктов несут информацию о едином ме-

ханизме подготовки этих землетрясений. Крайне важно и то, что этот механизм един для разных континентов. Можно полагать, он является универсальным.

Они также подтвердили высказанные ранее теоретические соображения о том, что процессом подготовки корового землетрясения является накопление в его очаге упругих изгибных сейсмогенных деформаций и поэтому деформационным признаком (предвестником) подготовки и созревания очага корового землетрясения является упругий изгиб горных пород в этом очаге. Однако, с точки зрения рассматриваемой нами проблемы, главная ценность этих данных заключается в том, что они открывают путь к реальному прогнозу землетрясений, так как доказывают участие земной поверхности в процессах подготовки очага землетрясения. Локальные поля напряжений, порождающие очаги коровых землетрясений возникают из-за появления в сейсмогенном разломе концентраторов напряжений, представляющих собой участки разлома, в которых по тем или иным причинам прекратились смещения по разлому. Такие концентраторы напряжений Г. А. Гамбургцев очень метко назвал «спайками». Согласно принципу Сен-Венана «спайки» представляют собой дополнительные нагрузки в системе смещающихся блоков земной коры. Именно они и порождают локальные поля упругих напряжений экспоненциального вида, что и подтверждено геодезическими исследованиями.

Итак, на основании анализа геодезических данных рисунка 1 можно сделать следующие выводы:

1. Коровая сейсмичность порождается локальными полями напряжений экспоненциального вида, имеющими размеры от 20 до 40 км.

2. Схожесть выявленных смещений геодезических пунктов для всех пяти землетрясений убедительно говорит о том, что эти данные несут информацию о едином механизме подготовки этих землетрясений.

3. Процессом подготовки корового землетрясения является накопление в его очаге упругих изгибных сейсмогенных деформаций. Деформационным признаком подготовки очага корового землетрясения является упругий изгиб горных пород в этом очаге.

4. Процесс подготовки очага землетрясения захватывает и земную поверхность, являющейся верхней поверхностью готовящегося очага землетрясения и именно это позволяет отслеживать этот процесс непосредственно на этой поверхности.

5. Процесс подготовки очагов землетрясений можно отслеживать лишь геодезическими методами, которые позволяют определять упругие смещения земной поверхности на базах в десятки километров, тем самым определяя действительный вид кривой линии этих смещений.

С целью большей убедительности высказанных соображений рассмотрим причину появления закономерных смещений пунктов триангуляции при землетрясениях (рис. 1), что демонстрируется рисунком 2.

На рисунке 2А показан один и то же участок сейсмогенного разлома (вертикальная линия) в три момента: t_0 , t_1 и t_2 , соответствующие различным напряженным состояниям горных пород. Стрелки – направления тектонических смещений на разломе. Момент t_0 – в горных породах отсутствуют сейсмогенные напряжения, что показано прямой **ab**. Момент t_1 – горные породы предельно напряжены локальным полем упругих напряжений экспоненциального вида (упругий изгиб): кривая **ab**. Момент t_2 – положение горных пород после землетрясения, при котором произошли следующие события: магистральный разрыв горных пород в очаге; смещение

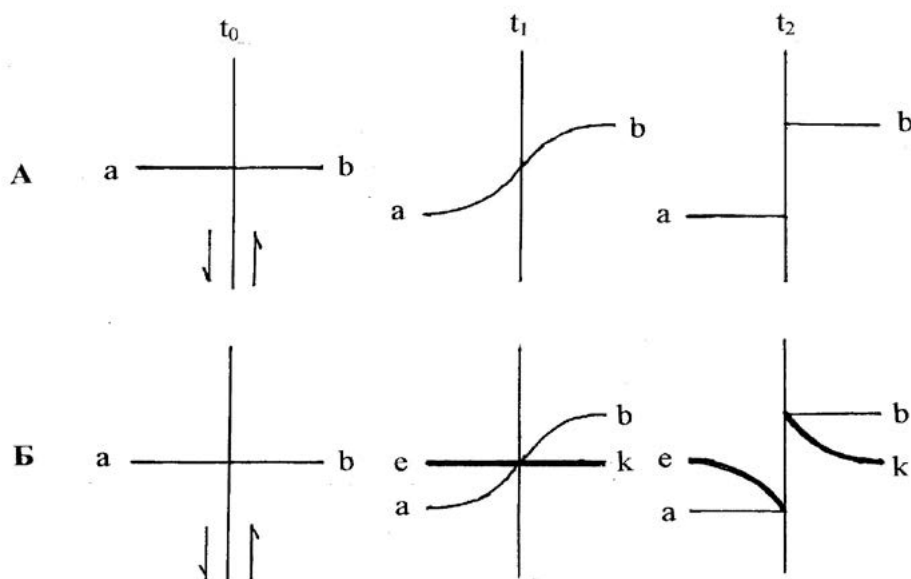


Рис. 2. Объяснение явления экспоненциального распределения смещений геодезических пунктов в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений. /

Fig. 2. An explanation of the phenomenon of the exponential distribution of displacements of geodetic points in the epicentral zones of strong crustal earthquakes.

горных пород по этому разрыву и благодаря этому сброс накопленных в них ранее изгибных сейсмогенных деформаций – прямолинейные отрезки **a** и **b**.

Теперь обратимся к рисунку 2Б, который отличается от рисунка 2А лишь тем, что в нем имеется прямая **ек**, представляющая собой прямолинейное геодезическое построение (геодезический профиль) созданное в момент t_1 , над зреющим очагом землетрясения. После 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 изогнутых отрезка **e** и **k** являются зеркальным отображением двух половинок упругой кривой **ab**, так как в результате землетрясения кривая **ab** и прямая **ек** обменялись своими формами и, следовательно, в этих изогнутых отрезках сохранилась информация о величине упругих деформаций, накопленных в очаге к моменту создания этого геодезического профиля.

Согласно этому выводу есть основания считать, что во всех приведенных на рисунке 1 случаях исходные триангуляционные измерения были выполнены над уже готовящимися очагами землетрясений, т.е. в них уже были накоплены, к моменту исходной (выполненной до землетрясения) триангуляции, 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 рисунке 1.

Итак, выполненные исследования подтвердили научную прозорливость Г. А. Гамбурцева в выборе правильного пути решения прогноза землетрясений. На этих основах была разработана деформационная модель механизмов зарождения и подготовки очагов коровых землетрясений, из которой следует, что геодезические измерения деформаций в зонах сейсмогенных разломов позволяют определить точные прогнозы места готовящегося очага землетрясения и его максимально возможную силу, а также открывают пути к прогнозу его времени. Осуществление возможно с помощью специальных геодезических прогнозных систем, основным элементом которых является геодезический прогнозный профиль, представляющий собой прямолинейное геодезическое построение с количеством пунктов, достаточным для уверенного определения вида упругой кривой.

Принципиальная схема геодезической прогнозных системы показана на рисунке 3.

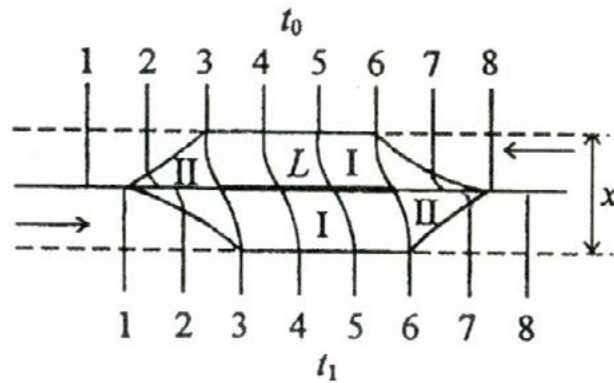


Рис. 3. Модель упругого деформирования земной поверхности над очагом готовящегося землетрясения (в момент t_1) и схема реализации прогноза силы готовящегося землетрясения. / Fig. 3. The model of elastic deformation of the earth's surface above the source of the impending earthquake (at time t_1) and the forecast implementation scheme for the strength of the impending earthquake.

Линии (1–1,...8–8) – геодезические прогнозных 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 (длина «спайки»); x – ширина очага землетрясения; стрелки – направления сжимающих полей локальных напряжений порождаемых спайкой.

Что касается прогноза места очага землетрясения то согласно рисунку 1 для этого достаточно и одного прогнозных профиля, расположенного над готовящимся очагом землетрясения (профили 3–6). Что же касается прогноза силы землетрясения, то, так как она определяется размерами очага (его длины) и поэтому для этого прогноза необходима система профилей, позволяющая определить эту величину (L на рис. 3).

С прогнозом времени землетрясения все гораздо сложнее, так как для этого нужно иметь представление о закономерностях разрушения очагов землетрясений

в природных условиях. Приступить к таким исследованиям можно и нужно после осуществления прогнозов места и силы землетрясения. Совершенно очевидно, что это должны быть комплексные исследования, в которых приоритетными следует считать изучение деформационных процессов в непрерывном режиме геодезическими, деформометрическими, наклономерными и сейсмологическими методами.

Выводы

Таким образом, есть все основания считать, что точные прогнозы места и максимально возможной силы готовящегося корового землетрясения являются прерогативой геодезического метода, а для прогноза времени землетрясения следует использовать комплексные исследования, осуществляемые в непрерывном режиме.

Первая геодезическая прогнозная система была создана в Мексике на разломе Империял (южное окончание разлома Сан-Андреас) вблизи города Мехикали – столицы Штата Нижняя Калифорния; вторая система создана в Республике Северная Осетия-Алания на Владикавказском прогностическом полигоне [Певнев, Заалишвили, 2014; Певнев и др., 2014, 2018]. В настоящее время такая система создается в Колумбии. Отказ от научно обоснованной концепции прогноза коровых землетрясений Г. А. Гамбурцева обернулся существенной потерей времени, интеллектуальных и финансовых вложений, а может быть и бедствиями из-за не предсказанных землетрясений. Прогнозистам, исповедовавшим, и может быть еще исповедующих гипотезу региональных полей напряжений в решении рассматриваемой проблемы пора сбросить шоры с глаз и отказаться от своих амбиций – ведь речь идет о возможности избавления жителей сейсмоопасных районов от ужаса непредсказанных сейсмических катастроф. По нашему убеждению настала насущная необходимость безотлагательно вернуться к прерванным ранее исследованиям Г. А. Гамбурцева.

Литература

1. Гогмачадзе С. А., Заалишвили В. Б., Одишария А. В., Кипиани Д. Г. Апрельские землетрясения 2002 г. в Тбилиси. // Труды II Кавказской международной школы семинара молодых ученых «Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе», Владикавказ, 20-22 сентября, 2007. – Владикавказ. – 2007. – С. 55-88.
2. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
3. Касахара К. Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
4. Кейлис-Борок В. И. До аплодисментов еще далеко. Газета «Известия». 2.11.1989. – № 307.
5. Кондратьев О. К. Разведочная геофизика с целью прогноза землетрясений // Геофизика. – 1995. – № 3. – С. 19-25.
6. Лукк А. А., Дещеревский Ф. В., Сидорин А. Я., Сидорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. – М.: ОИФЗ РАН, 1996. – 210 с.
7. Певнев А. К., Заалишвили В. Б. О причинах коровой сейсмичности и возможности прогноза землетрясений методами решения прямых задач. // Геология и геофизика Юга России, Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А. – 2014. – № 4. Т. 2. – С. 91-99.
8. Певнев А. К., Заалишвили В. Б., Мельков Д. А. О модернизации геодезических исследований на Владикавказском геодинамическом прогнозном полигоне. // Геология и геофизика Юга России, Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А. – 2014. – № 4. Т. 2. – С. 84-90.
9. Певнев А. К., Заалишвили В. Б., Мельков Д. А. Геодезический прогнозный мониторинг на территории Республики Северная Осетия-Алания. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2018. – № 4 (75). – С. 7-11.

10. Садовский М. А. О программе совместных Советско-Американских работ по поискам предвестников землетрясений. // Поиски предвестников землетрясений. (Международный симпозиум. 27 мая- 3 июня 1974 г.). – Ташкент: Изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1976. – С. 9-15.
11. Cattania C., Werner M. J., Marzocchi W., Hainzl S., Rhoades D., Gerstenberger M., et al. The forecasting skill of physics-based seismicity models during the 2010-2012 Canterbury, New Zealand, earthquake sequence. // *Seismological Research Letters*. – 2018. – Vol. 89 (4). – pp. 1238-1250. <https://doi.org/10.1785/0220180033>
12. Cocco M., Hainzl S., Catalli F., Enescu B., Lombardi A. M., Woessner J. Sensitivity study of forecasted aftershock seismicity based on Coulomb stress calculation and rate- and state-dependent frictional response. // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – Vol. 115 (B5). B05307. <https://doi.org/10.1029/2009JB006838>
13. Field E. H., Arrowsmith R. J., Biasi G. P., Bird P., Dawson T. E., Felzer K. R., et al. Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 3 (UCERF3). The time-independent model. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2014. – Vol. 104 (3). – pp. 1122-1180. <https://doi.org/10.1785/0120130164>
14. Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D. D. Comparison of short-term and time-independent earthquake forecast models for Southern California. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2006. – Vol. 96 (1). – pp. 90-106. <https://doi.org/10.1785/0120050067>
15. Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D. D. High-resolution time-independent grid-based forecast for $M > 5$ earthquakes in California. // *Seismological Research Letters*. – 2007. – Vol. 78 (1). – pp. 78-86. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.1.78>
16. Jordan T. H., Marzocchi W., Michael A. J., Gerstenberger M. C. Operational earthquake forecasting can enhance earthquake preparedness. // *Seismological Research Letters*. – 2014. – Vol. 85 (5). – pp. 955-959. <https://doi.org/10.1785/0220140143>
17. Lombardi A. M. Integration of geological and seismological data in earthquakes occurrence models for Italy: towards a unified model for different forecast perspectives. // *Geophysical Journal International*. – 2019. – Vol. 219. Issue 3. – pp. 2148-2164, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz419>
18. Mancini S., Segou M., Werner M. J., Cattania C. Improving physics-based aftershock forecasts during the 2016-2017 Central Italy Earthquake Cascade. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124. – pp. 8626-8643. <https://doi.org/10.1029/2019JB017874>
19. Marzocchi W., Taroni M., Falcone G. Earthquake forecasting during the complex Amatrice-Norcia seismic sequence. // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3 (9). e1701239. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701239>
20. Rhoades D. A., Schorlemmer D., Gerstenberger M. C., Christophersen A., Zechar J. D., Imoto M. Efficient testing of earthquake forecasting models. // *Acta Geophysica*. – 2011. – Vol. 59 (4). – pp. 728-747. <https://doi.org/10.2478/s11600-011-0013-5>
21. Segou M., Parsons T., Ellsworth W. Comparative evaluation of physics-based and statistical forecasts in Northern California. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2013. – Vol. 118. – pp. 6219-6240. <https://doi.org/10.1002/2013JB010313>
22. Tapia-Hernandez E., Reddy E. A., OrosAvilés L. J. Earthquake predictions and scientific forecast: dangers and opportunities for a technical and anthropological perspective. // *Earth Sciences Research Journal*. – 2019. – Vol. 23 (4). – pp. 309-315. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.77206>
23. Toda S., Stein R. S., Richards-Dinger K., Bozkurt B. S. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110 (B5). B05S16. <https://doi.org/10.1029/2004JB003415>
24. Werner M. J., Helmstetter A., Jackson D. D., Kagan Y. Y. High-resolution long-term and short-term earthquake forecasts for California. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2011. – Vol. 101 (4). – pp. 1630-1648. <https://doi.org/10.1785/0120090340>

25. Zechar J.D., Gerstenberger M. C., Rhoades D.A. Likelihood based tests for evaluating space-rate-magnitude earthquake forecasts. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2010. – Vol. 100 (3). – pp. 1184-1195. <https://doi.org/10.1785/0120090192>

References

1. Gogmachadze S. A., Zaalishvili V. B., Odisharia A. V., Kipiani D. G. April 2002 earthquakes in Tbilisi. In: *Proceedings of the II Caucasus International School seminar for young scientists "Seismic hazard and seismic risk management in the Caucasus"*, Vladikavkaz, September 20-22, 2007. Vladikavkaz. 2007. pp. 55-88. (In Russ.)
2. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation of territories of cities, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka, 2009. 350 p. (In Russ.)
3. Kasakhara K. *Mechanics of earthquakes*. Moscow. Mir, 1985. 264 p. (In Russ.)
4. Keilis-Borok V. I. The applause is still a long way off. *Newspaper Izvestia*. 2.11.1989. No. 307. (In Russ.)
5. Kondrat'ev O. K. Exploration geophysics aimed to forecast earthquakes. *Geophysics*. 1995. No. 3. pp. 19-25. (In Russ.)
6. Lukk A. A., Deshcherevskii F. V., Sidorin A. Ya., Sidorin I. A. Variations of geophysical fields as a manifestation of deterministic chaos in a fractal medium. Moscow. IPE RAS, 1996. 210 p. (In Russ.)
7. Pevnev A. K., Zaalishvili V. B. The causes of crustal seismicity and the possibility of predicting earthquakes by methods of solving direct problems. *Geology and geophysics of Russian South*, 2014. No. 4. Vol. 2. pp. 91-99. (In Russ.)
8. Pevnev A. K., Zaalishvili V. B., Melkov D. A. On the modernization of geodetic surveys at the Vladikavkaz geodynamic forecasting range. *Geology and geophysics of Russian South*, 2014. – No. 4. Vol. 2. pp. 84-90. (In Russ.)
9. Pevnev A. K., Zaalishvili V. B., Melkov D. A. Geodetic forecast monitoring in the Republic of North Ossetia-Alania. In: *Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS*. 2018. No. 4 (75). pp. 7-11. (In Russ.)
10. Sadvskii M. A. About the program of joint Soviet-American work on the search for earthquake precursors. *Search for earthquake precursors*. (International Symposium. May 27 – June 3, 1974). Tashkent. Publishing House "FAN" of the Uzbek SSR, 1976. pp. 9-15. (In Russ.)
11. Cattania C., Werner M. J., Marzocchi W., Hainzl S., Rhoades D., Gerstenberger M., et al. The forecasting skill of physics-based seismicity models during the 2010-2012 Canterbury, New Zealand, earthquake sequence. *Seismological Research Letters*. 2018. Vol. 89 (4). pp. 1238-1250. <https://doi.org/10.1785/0220180033>
12. Cocco M., Hainzl S., Catalli F., Enescu B., Lombardi A. M., Woessner J. Sensitivity study of forecasted aftershock seismicity based on Coulomb stress calculation and rate- and state-dependent frictional response. *Journal of Geophysical Research*. 2010. Vol. 115 (B5). B05307. <https://doi.org/10.1029/2009JB006838>
13. Field E. H., Arrowsmith R. J., Biasi G. P., Bird P., Dawson T. E., Felzer K. R., et al. Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 3 (UCERF3). The time-independent model. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2014. Vol. 104 (3). pp. 1122-1180. <https://doi.org/10.1785/0120130164>
14. Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D. D. Comparison of short-term and time-independent earthquake forecast models for Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. Vol. 96 (1). pp. 90-106. <https://doi.org/10.1785/0120050067>
15. Helmstetter A., Kagan Y., Jackson D. D. High-resolution time-independent grid-based forecast for $M \geq 5$ earthquakes in California. *Seismological Research Letters*. 2007. Vol. 78 (1). – pp. 78-86. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.1.78>

16. Jordan T.H., Marzocchi W., Michael A.J., Gerstenberger M.C. Operational earthquake forecasting can enhance earthquake preparedness. *Seismological Research Letters*. 2014. Vol. 85 (5). – pp. 955-959. <https://doi.org/10.1785/0220140143>
17. Lombardi A.M. Integration of geological and seismological data in earthquakes occurrence models for Italy: towards a unified model for different forecast perspectives, *Geophysical Journal International*. 2019. Vol. 219. Issue 3. pp. 2148-2164, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz419>
18. Mancini S., Segou M., Werner M.J., Cattania C. Improving physics-based aftershock forecasts during the 2016-2017 Central Italy Earthquake Cascade. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. Vol. 124. pp. 8626-8643. <https://doi.org/10.1029/2019JB017874>
19. Marzocchi W., Taroni M., Falcone G. Earthquake forecasting during the complex Amatrice-Norcia seismic sequence. *Science Advances*. 2017. Vol. 3 (9). e1701239. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701239>
20. Rhoades D.A., Schorlemmer D., Gerstenberger M.C., Christophersen A., Zechar J.D., Imoto M. Efficient testing of earthquake forecasting models. *Acta Geophysica*. 2011. Vol. 59 (4). pp. 728-747. <https://doi.org/10.2478/s11600-011-0013-5>
21. Segou M., Parsons T., Ellsworth W. Comparative evaluation of physics-based and statistical forecasts in Northern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. Vol. 118. pp. 6219-6240. <https://doi.org/10.1002/2013JB010313>
22. Tapia-Hernandez E., Reddy E.A., OrosAvilés, L.J. Earthquake predictions and scientific forecast: dangers and opportunities for a technical and anthropological perspective. *Earth Sciences Research Journal*. 2019. Vol. 23 (4). pp. 309-315. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.77206>
23. Toda S., Stein R.S., Richards-Dinger K., Bozkurt B.S. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110 (B5). B05S16. <https://doi.org/10.1029/2004JB003415>
24. Werner M.J., Helmstetter A., Jackson D.D., Kagan Y.Y. High-resolution long-term and short-term earthquake forecasts for California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2011. Vol. 101 (4). pp. 1630-1648. <https://doi.org/10.1785/0120090340>
25. Zechar J.D., Gerstenberger M.C., Rhoades, D.A. Likelihood based tests for evaluating space-rate-magnitude earthquake forecasts. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. Vol. 100 (3). pp. 1184-1195. <https://doi.org/10.1785/0120090192>