

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2014.1.55403

К ПРОБЛЕМЕ ИЗУЧЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ОЧАГОВОЙ И БЛИЖНЕЙ ЗОНАХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2014 Э.Г. Геодакян, к.ф.-м.н., С.М. Оганесян, член-корр. НАН РА,
д.ф.-м.н., профессор, Дж.К. Карапетян, к.г.-м.н.

Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА,
3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна, 5, Республика Армения

Геологическая среда распространения волнового поля характеризуется геометрическим расхождением и поглощением упругих сейсмических волн. Основными факторами, влияющими на уровень сейсмического эффекта в пункте наблюдения, является геологическое строение 30-ти метрового «инженерного» слоя грунта, наличие в нем различных включений и их мощности, а также плотность и пористость грунтовых пород, насыщенных различными флюидами. В то же время сопоставление сейсмологических данных с геологическим строением региона при разрушительных землетрясениях 1985 г. (Мексика) и 1988 г. (Армения) показывает, что причиной наблюдаемых эффектов усиления сейсмического воздействия на значительных расстояниях от эпицентров, стало резонансное усиление амплитуды колебаний в верхней части разреза, мощностью несколько сотен метров. Также следует отметить, что наблюдаемые эффекты изменений сейсмических воздействий связаны как с интенсивностью волнового поля (геометрическая нелинейность), так и с геолого-геофизическими свойствами среды (физическая нелинейность).

Ключевые слова: геолого-геофизическая среда, сейсмический эффект.

Введение

На современном этапе развития инженерно-сейсмологических исследований однозначно установлено, что сейсмический эффект на поверхности Земли зависит от ряда основных факторов, связанных с очагом землетрясения, физико-механическими свойствами среды распространения сейсмических волн, а также с геолого-геофизическими условиями грунтовых пород в пунктах регистрации.

В качестве основных характеристик очага принимаются – магнитуда и механизм очага, а также амплитудно-частотный спектр сейсмического излучения и ее продолжительность.

Реальная геологическая среда распространения волнового поля характеризуется геометрическим расхождением и поглощением упругих сейсмических волн. Основными факторами, влияющими на уровень сейсмического эффекта в пункте наблюдения, является геологическое строение 30-ти метрового «инженерного» слоя грунта, наличие в нем различных включений и их мощности, а также плотность и пористость грунтовых пород, насыщенных различными флюидами.

Разработанные к настоящему времени многочисленные эмпирические зависимости параметров сейсмического эффекта от вышеуказанных факторов широко применяются в сейсмологической практике оценки сейсмической опасности [Штейнберг В. В. и др., 1993, Аптикаев, 2001; Карапетян, 2011, 2012; Douglas, 2001; Fukushima et al., 2003]. Однако, эти зависимости не дают объяснения, а в лучшем случае неадекватно оценивают аномальные изменения сейсмических воздействий,

нередко возникающих при сильных и разрушительных землетрясениях (Гоби-Алтай, 1957 г., $M_S=7,5$; Мексика, 1985 г., $M_S=7,9$; Армения, 1988 г., $M_S=7,0$; Япония, 2011 г., $M_W=9,8$). Так, при сильнейшем Гоби-Алтайском землетрясении 1957 года в эпицентральной области наблюдалась сейсмическая интенсивность $I=11\div 12$ баллов, которая на расстоянии 20-25 км от эпицентра снижалась до значений $I=5\div 5,5$ баллов. На эпицентральных расстояниях 55 км, эффект вновь устанавливался до $I=12$ баллов [Аптикаев, 2001]. Такие же эффекты наблюдались при Мексиканском землетрясении 1985 г., в г. Мехико на расстоянии 400 км от эпицентра [Campillo et al, 1989]. При Спитакском землетрясении 7 декабря 1988 года эффект усиления сейсмической интенсивности наблюдался в г. Ленинакане (Гюмри), на расстоянии 40 км от эпицентра землетрясения [Field, E. H. et. Al. 1995, Геодакян и др., 1991; Геодакян, 2002; Новикова, Раутиан, 1991; Халтурин и др., 1991].

Анализ литературных источников исследований этих эффектов показывает, что некоторые исследователи связывают их с формированием в очаговой и ближней зоне сильных землетрясений стоячих, ударных и поперечных изгибных волн [Аптикаев, 2001; Быков, 2000; Кольский, 1955; Оганесян, 2012; Оганесян, 2013; Оганесян и др., 2013; Пшеников, 1965].

На основе экспериментальных данных наблюдений за ядерными взрывами Ф. Аптикаев приходит к выводу, что возникающие при формировании стоячих волн пучности и узлы приводят к усилению или понижению уровня сейсмических воздействий [Аптикаев, 2001].

В теоретических исследованиях по возникновению и распространению линейных и нелинейных волн в диспергирующих сплошных средах в [Багдоев и др., 2009] авторы указывают, что важнейшими компонентами исследования волновых процессов являются вопросы выявления законов линейной и нелинейной дисперсии, видов амплитудно-частотной модуляции, условий возникновения и распространения волновых пучков и их фокусирование.

Следует отметить, что при изучении вышеуказанных разрушительных землетрясений проводились сейсмические исследования по ряду из этих направлений. Так, на основе инструментальных данных записей афтершоков Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. был проведен спектральный анализ сейсмических излучений очаговой зоны и выявлен мультиплетный характер вспаривания очага, как основного толчка, так и его сильнейших афтершоков, состоящих из нескольких субочагов [Геодакян, 2002; Новикова, Раутиан, 1991]. Изучение скоростной структуры волнового поля реальной геологической среды в очаговой и ближней зонах Спитакского землетрясения и проявления макросейсмического эффекта на поверхности, выявило взаимосвязь изменения скоростных характеристик поперечных объемных сейсмических волн с усилением и понижением макросейсмического эффекта [Татевосян и др., 2011]. В работе [Davis et. al. 2000] исследовано влияние фокусировки сейсмических волн от погребенных структур на интенсивность сотрясений.

В ряде работ, посвященных анализу сейсмологических данных и их сопоставления с геологическим строением региона при разрушительных землетрясениях 1985 г. (Мексика) и 1988 г. (Армения) пришли к выводу, что причиной наблюдаемых эффектов усиления сейсмического воздействия на значительных расстояниях от эпицентров, стало резонансное усиление амплитуды колебаний в верхней части разреза, мощностью несколько сотен метров [Халтурин и др., 1991; Campillo et. al., 1989; Lee, Trifunac, 2010].

Особо следует отметить невероятно высокие с инженерно-сейсмологической точки зрения значения ускорений колебаний грунта при Великом Японском землетрясении 2011 г. По данным регистрации максимальных ускорений на различных эпицентральных расстояниях при этом землетрясении зафиксированы возникновения ускорений колебаний грунта от 1,2-2,7 g на эпицентральных расстояниях от 100 до 400 км от эпицентра [Карапетын, 2012; Карапетын, 2013].

Результаты вышеприведенных исследований макросейсмических эффектов на поверхности Земли, а также инструментальные данные указывают, что наблюдаемые эффекты изменений сейсмических воздействий связаны как с интенсивностью волнового поля (геометрическая нелинейность), так и с геолого-геофизическими свойствами среды (физическая нелинейность). Оба типа нелинейности указывают влияние на формирование нелинейных эффектов сейсмических воздействий.

Исходя из вышеизложенного, приходим к заключению, что наиболее перспективным направлением являются исследования формирования и распространения упругих сейсмических волн в сложных геолого-геофизических средах с учетом их свойств нелинейности.

На основе этих исследований должны быть разработаны математические модели источников излучения сейсмических волн, а также математические модели реальных геологических сред распространения упругих сейсмических волн. Для достижения этих целей следует рассматривать следующие основные задачи:

1. Изучить нелинейности геолого-геофизических сред формирования и распространения упругих сейсмических волн.
2. На основе имеющихся геофизических и сейсмологических данных, а также путем проведения дополнительных сейсмологических исследований определить численные значения коэффициентов поглощения и скоростей упругих волн в горных породах.
3. Математическое моделирование нелинейных сейсмических эффектов.

Нелинейность геолого-геофизических сред распространения упругих сейсмических волн.

Выявление взаимосвязи динамических характеристик упругих сейсмических волн с физико-механическими свойствами геологической среды их распространения, является одним из основных направлений сейсмологических исследований.

Физические механизмы, диссипатии, дисперсия и нелинейность реальных горных пород довольно разнообразны и зависят от типа сейсмических волн и характера неравновесности среды. Поэтому построение математических моделей необходимо для определения возможных источников нелинейности, выявления основных механизмов, вызывающих искажения сигналов в различных горных породах и параметров, оказывающих наибольшее влияние на величину поглощения, дисперсии и нелинейности.

Для этих целей особый интерес представляют модели, в которых математическое описание физических процессов в геологических средах сводится к нелинейным эволюционным уравнениям.

Особо следует рассмотреть возможность применения эволюционных уравнений типа уравнений Буссинеске, Бюргера, Син-Гордона, которые имеют точные аналитические решения и достаточно хорошо изучены в различных областях физики. Это

существенно упрощает анализ и позволяет детально изучить физическую картину аномальных проявлений сейсмического эффекта [Быков, 2000; Быков, 2000].

Довольно перспективно также рассмотреть возможность применения этих уравнений для построения моделей нелинейных волновых процессов сейсмической активности разломов земной коры.

Поглощение и скорости упругих волн в геологических средах.

В этом направлении особый интерес представляется в определении на основе экспериментальных данных скоростей распространения упругих сейсмических волн в очаговой и ближней зонах сильнейших землетрясений, наблюдаемых на территории Армении при Спитакском землетрясении количественных параметров диссипации (коэффициент α и декремент δ поглощения, добротность среды Q).

Эти параметры дают возможность изучить необратимые процессы передачи энергии сейсмических волн частицам геологической среды.

Параметры поглощения связаны между собой следующим образом [Быков, 2000]:

$$\delta = \frac{2\pi\alpha v}{\omega}, \quad Q = \frac{\pi}{\delta}, \quad \delta = \frac{2\pi\alpha v}{\omega}, \quad Q = \frac{\pi}{\delta}, \quad Q^{-1} = \frac{2\alpha v}{\omega}, \quad Q^{-1} = \frac{2\alpha v}{\omega},$$

где v – скорость распространения сейсмической волны, ω – частота, Q^{-1} – удельная диссипативная функция, Q – добротность среды.

Численные значения этих параметров дают возможность рассчитать коэффициенты эволюционных уравнений, моделирующих геологическую среду распространения сейсмических волн.

Математическое моделирование линейных и нелинейных сейсмических эффектов.

С математической точки зрения, линейность и нелинейность определяются видом уравнений, включающих либо неизвестные в степени $n \neq 1$, либо зависящие от свойств среды коэффициенты.

С целью моделирования эффектов аномальных проявлений сейсмических воздействий на поверхности Земли, кроме вышеуказанных уравнений следует рассмотреть эволюционные уравнения Шредингера, которые довольно реалистично моделируют физические процессы генерации, взаимодействия и распространения сейсмических волн в геологических средах [Багдоев и др., 2000]. Особое внимание заслуживают вопросы, связанные со слоистостью, трещиноватостью среды в пунктах наблюдений этих эффектов, так как в таких средах особенно отчетливо проявляются нелинейные свойства.

Результаты выше рассмотренных исследований позволяют существенно прояснить сложные физические процессы, возникающие в очагах сильных землетрясений и связанных с ними процессами формирования и распространения сейсмических волн в реальных геологических средах. Разработанные на основе этих исследований математические модели взаимосвязи параметров очага, реальной геологической среды распространения сейсмических волн и физико-механических свойств горных пород в пунктах наблюдений с количественными параметрами сейсмических воздействий, дадут возможность оценить реальные величины ожидаемых от сильных землетрясений сейсмических воздействий на различных эпицентральных расстояниях.

Эти модели позволят приступить к актуализации существующих карт сейсмической опасности территории Армении с новых научных позиций, учитывающих нелинейные процессы.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях. Автореферат дис. по соисканию ученой степени доктора физ-мат. наук Москва, 2001 г. 45с.
2. Багдоев А.Г., Ерофеев В.И., Шикоян А.В. Линейные и нелинейные волны в диспергирующих сплошных средах. Москва, Изд. физматмет, 2009 г. 318стр.
3. Быков В.Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. Владивосток: Дальнаука, 2000.190с.
4. Быков В.Г. Эволюция волн разрушения в неоднородном разломе земной коры // Докл. АН.2000. Т.370. N1. С.102-104.
5. Быков В.Г. Уединенные волны в разломе земной коры // Вулканология и сейсмология. 2000. N6. с49–54.
6. Геодакян Э.Г., Галинский Г.Л., Папалишвили В.Г. и др. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. Карты изосейст. Землетрясения в СССР в 1988 г. М. Изд.-во Наука, 1991, с. 74-86.
7. Геодакян Э.Г. Спектральные характеристики очаговых излучений Спитакской сейсмической зоны. Сп. науч. трудов конференции посвященной 40-летию ИГИС. Изд. «Гитутюн» НАН РА, Гюмри, 2002 г., с. 299-311.
8. Карапетян Дж.К. Статистический анализ количественных параметров сейсмического воздействия Японского 11.03.2011 землетрясения. // В кн.: Сб. научных трудов конференции, посвященной 50-летию основания ИГИС НАН РА. – Гюмри, Изд. “Гитутюн”, НАН РА, 2011, с. 344-362 (на арм. яз.).
9. Карапетян Дж.К. Сопоставительный анализ расчетных кривых коэффициента динамичности β (Т,n), полученных различными методами // Вопросы инженерной сейсмологии. ISSN 0132-2826. 2012, Т.39. №3. стр. 33-40.
10. Карапетян Дж.К. Учет результатов зарегистрированных сейсмических колебаний разрушительных и Великого Японского землетрясений 11.04.2011 г. при оценке сейсмической опасности // Геология и геофизика Юга России, №2,2013, с.75-85.
11. Кольский Г. Волна напряжения в твердых телах. М.: ИЛ, 1955. Стр. 192.
12. Новикова Е.И., Раутиан Т.Г. Параметры очага Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. Изв. АН СССР Физика Земли, 1991, N12, Наука, с.32-46.
13. Оганесян С.М. К постановке задачи о распространении упругих волн чистого изгиба и изгиба в однородном консольном стержне // В кн.: Опасные процессы в горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Владикавказ, 2012, стр. 316-325.
14. Оганесян С.М. Постановка задач о распространения упругих волн чистого изгиба и изгиба при поперечных колебаниях однородного консольного стержня. // ДНАН РА, 2013, т.113, N3.
15. Оганесян С.М., Мурадян А.Р., Оганесян А.О. Задача кинематического возбуждения жестко заземленного с двух сторон однородного стержня, как модель возникновения и распространения сейсмической волны в ближней зоне очага землетрясения // В кн.: Труды I международной конференции молодых ученых, посвя-

щенной 70-летию основания НАН РА. – Гюмри, Изд. ‘Гитутюн’, НАН РА, 2013, с. 310-313.

16. Пшеников К.В. Механизм возникновения афтершоков и неупругие свойства земной коры // Изд. Наука, М., 1965, 87 с.

17. Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я., Дорбат К., Вакарчук Р.Н., Татевосян Т.Н. Скоростная структура среды и макросейсмический эффект: Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. Изд. РАН «Физика Земли», 2011 г. №9 стр. 72-82.

18. Халтурин В.И., Шомахмадов А.М., Геодакян Э.Г., Саргсян Н.М., Мхитарян Л.А. Усиление интенсивности колебаний в Леникане // Вопросы инженерной сейсмологии. 1991. Вып. 32. С. 5-14.

19. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф., Алказ В.Г., Гусев А.А., Ерохин Л.Ю., Заградник И., Кендзера А.В., Коган Л.А., Лутиков А.И., Попова Е.В., Раутиан Т.Г., Чернов Ю.К. Методы оценки сейсмических воздействий (пособия) // Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1993, вып. 34. 95 с.

20. Campillo M., Gariel J.C., Aki K. et al. Destructive strong ground motion in Mexico city: Source, path, and site effects during great 1985 Michoacan earthquake // Bull. Seismol. Soc. Am. 1989. V.79. N6. P. 1718-1735.

21. Davis P.M., Rubinstein J.L., Liu K.H., Gao S.S., Knopoff L. 2000. Northridge Earthquake Damage Caused by Geologic Focusing of Seismic Waves // Science DOI: 10.1126/science.289.5485.1746289

22. Douglas J., 2001. A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). Imperial College of Science, Technology and Medicine Civil Engineering Department London SW72BU, ESEE Report No. 01-1. P.144.

23. Field, E. H., Clement A. C., Jacob K. H., Aharonian V., Hough S. E., Friberg P. A., Babiian T. O., Karapetian S. S., Hovanessian S. M., and Abramaian H. A. (1995). Earthquake site-response study in Giumri (formerly Leninakan), Armenia, using ambient noise observations, Bull. Seism. Soc. Am. 85, 349-353.

24. Fukushima Y., Berge-Thierry C., and Volant Ph., Griot-Pommerer, D. A., Cotton F. [2003] Attenuation relation for west Eurasia determined with recent near-fault records from California, Japan and Turkey. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 3, Imperial College Press, p.1-26.

25. Lee V. W., Trifunac M. D. Should average shear-wave velocity in the top 30m of soil be used to describe seismic amplification? // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2010. V. 30. P. 1250-1258.

DOI: 10.23671/VNC.2014.1.55403

**TO THE PROBLEM OF INVESTIGATION OF ABNORMAL
APPEARANCE OF SEISMIC IMPACTS IN NEAR-SOURCE AND
NEAR-FIELD ZONES OF STRONG EARTHQUAKES**

**© 2014 E.G. Gyodakyan, Sc. Candidate (Phys.-math.), S.M. Hovhannisyan,
corr. Member of NAS RA, Sc.Doctor (Phys.-math.), prof., J.K. Karapetyan,
Sc.Candidate (Geol.)**

Institute of Geophysics and Engineering Seismology of NAS RA, Gyumri, Armenia

Geological medium of wavefield propagation is characterized by geometrical divergence and absorption of elastic waves. The main factors influencing the level of seismic effect at the observation point are geological structure of a 30m «engineering» layer of soil, the presence of a variety of inclusions and their power, and the density and porosity of ground rocks saturated with different fluids. At the same time, comparison of seismic data with the geological structure of the region during the strong earthquakes in 1985 (Mexico) and 1988 (Armenia) shows that the cause of the observed effects of amplification of the seismic action at considerable distances from the epicenters, was resonant amplification of the amplitude in the upper soil part of several hundreds of meters. It should also be noted that the effects of changes of observed seismic effect are associated with both the intensity of the wave field (geometric nonlinearity), and with geological and geophysical properties of the medium (the physical nonlinearity).