

УДК 550. 34.

Фролова А.Г., Берёзина А.В., Першина Е.В., Лиховод М.В.*Институт сейсмологии НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан***АНАЛОГОВЫЕ ЗАПИСИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КЫРГЫЗСТАНА
ПРИБОРАМИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ И ИХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ**

Аннотация. Выполнен анализ аналоговых записей землетрясений приборами для регистрации сильных движений. Сделана оцифровка записей. Наиболее качественные цифровые данные использованы для оценки спектральных параметров. Рассмотрено соответствие наблюдаемых спектральных амплитуд ускорений модельным значениям, полученным в других регионах.

Ключевые слова: аналоговые записи сильных землетрясений, оцифровка, спектры реакции, спектральные модели затухания.

**КҮЧТҮҮ КЫЙМЫЛДАРДЫ КАТТООЧУ АНАЛОГДУК ПРИБОРЛОРДУН
ЖАСЫЛМАЛАРЫН КЫРГЫЗСТАНДЫН АЙМАГЫНДА СЕЙСМИКАЛЫК
КОРКУНУЧКА БАА БЕРҮҮ МИЛДЕТТЕРИ ҮЧҮН ПАЙДАЛАНУУ**

Кыскача мазмуну. Күчтүү кыймылдарды каттоо үчүн приборлор менен жер титирөөлөрдү аналогдук каттоолорго талдоо жүргүзүү аткарылган. Каттап алууларды санариптештирүү жасалган. Эң сапаттуу санариптик маалыматтар спектралдык параметрлерге баа берүү үчүн колдонулган. Байкоо жүргүзүлгөн спектралдык ылдамдоолордун амплитудаларынын башка аймактардан алынган моделдик маанилерге шайкеш келүүсү караштырылган.

Негизги сөздөр. Күчтүү жер титирөөлөрдүн аналогдук каттоолору, санариптештирүү, реакция спектрлери, өчөбаштоонун спектралдык моделдери.

**ANALOGUE RECORDS OF EARTHQUAKES OF KYRGYZSTAN BY STRONG
MOTION EQUIPMENTS AND THEIR USING FOR SEISMIC HAZARD
ASSESSMENT PROBLEM**

Annotation. The analysis of analog seismograms of earthquakes recorded by the strong motions equipments is carried out. Records were digitized. The highest quality digital data were used to estimate the spectral parameters. The correspondence of the observed spectral amplitudes of accelerations to the model values obtained in other regions is considered.

Keywords: analog records of strong earthquakes, digitization, response spectra, spectral attenuation models.

Приборы для регистрации сильных движений. Для достоверной оценки сейсмической опасности необходимы записи сильных землетрясений, произошедших на исследуемой территории. В Кыргызстане первые приборы для регистрации сильных движений начали устанавливать с 1970 года. Это были горизонтальные сейсмографы СМР с механической регистрацией, электромагнитным затуханием и увеличением $V_{od}=7$ в полосе пропускания 2-5 сек. Запись выполнялась на закопчённую бумагу.

В те же годы на ряде станций были поставлены трёхкомпонентные велосиграфы С5С+ИСО-II. Регистрация скоростей колебаний грунта выполнялась на двух уровнях чувствительности $V_{ov} = 0.1$ и $V=2.5_{ov}$ в полосе периодов от 0.03 до 5 сек. Данные приборы предназначены для регистрации землетрясений с интенсивностью от 3-х до 8 баллов по шкале MSK-64. Сейсмометры С5С работали в сочетании с гальванометрами ГБ-IV. Запись выполнялась на фотоплёнку.

С 1978 года на станциях появились акселерографы ССРЗ – трёхкомпонентные приборы с прямой оптической регистрацией. Коэффициент чувствительности по ускорению $V_{oa} = 20$ мм/г в полосе частот от 0 до 20 Нз. Порог срабатывания прибора ССРЗ – 5 баллов в месте регистрации. Запись выполнялась на киноплёнку.

Кроме перечисленных приборов на станциях были установлены сейсмоскопы СБМ – простые приборы, работающие без развёртки во времени и предназначенные для оценки балльности в месте регистрации.

Велосиграфы и акселерографы оказались несовершенными в эксплуатации и большей частью не срабатывали даже в эпицентральных зонах. Простые по конструкции сейсмографы СМР были более надёжными. Всё это обусловило тот факт, что большую часть записей приборами для регистрации сильных движений составили смещения.

За период с 1970 по 2008 год приборами для регистрации сильных движений было зарегистрировано 130 землетрясений. Некоторые записи очень слабые, но для них есть аналоги, полученные более чувствительной аппаратурой (СК, СКД). Если за единицу принять запись землетрясения одним типом прибора на одной станции, то за этот период было получено 220 записей смещений, 63 – скоростей и только 6 записей ускорений, 4 из которых (довольно слабые) принадлежат Суусамырскому землетрясению 1992 года.

Оцифровка. Для дальнейшего использования аналоговых записей необходимо представить их в цифровом формате. В первоначальном варианте записи копировались вручную тушью на кальку и далее сканировались лазерным лучом [1]. Копирование записей вручную, естественно, искажало конечный результат. В настоящее время существуют специальные программы, которые позволяют более качественно выполнить оцифровку аналоговых записей, задавая определённый шаг (частоту оцифровки). При выполнении данной работы нами использовалась программа Wave Trask с частотой оцифровки 40 Гц [2]. На рисунке 1 приведён пример оцифровки сейсмограммы землетрясения, произошедшего 23 августа 1985 г. в 12 час. 42 мин. на территории Китая с $M = 7.1$, зарегистрированного прибором СМР на станции «Арал» на эпицентральной расстоянии $R=292$ км.

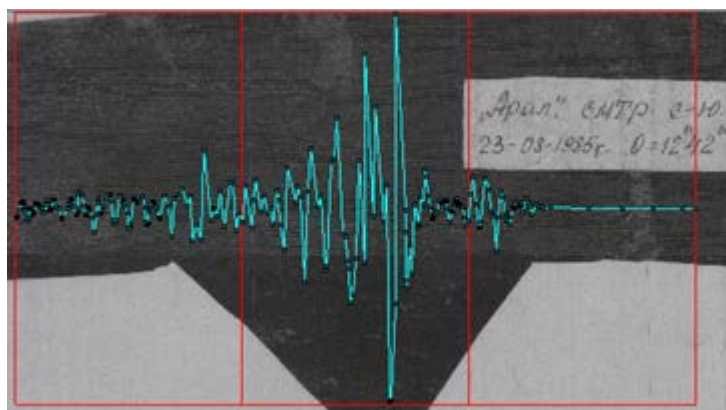


Рисунок 1. Пример оцифровки сейсмограммы землетрясения 23 августа 1985 г.

При оцифровке велосиграммы землетрясения 31 декабря 1982 г. в 19 час. 46 мин. ($M = 5.2$, $R=84$ км) рассмотрены записи станции «Каджи-Сай» на двух компонентах NS и EW, используя оба варианта увеличения приборов 0.1 и 2.5 (рисунок 2). От момента вступления продольной волны до вступления поперечной и читаемая кода поперечной волны оцифровывались на каналах с увеличением 2.5. Зашкаленные максимальные колебания поперечной волны оцифровывались на каналах с увеличением 0.1. Совмещение данных разных каналов происходило в программе Excel после исправления за нулевую линию и перехода от миллиметров на записи к истинным значениям амплитуд скорости колебаний грунта.

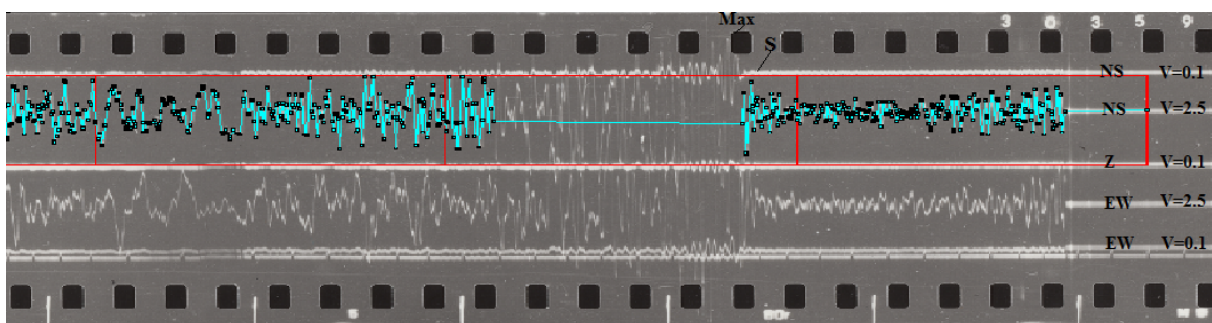


Рисунок 2. Фрагмент велосиграммы землетрясения 31 декабря 1982 г. и пример её оцифровки на компоненте NS с увеличением $V=2.5$.

Пересчёт записей смещений и скоростей в ускорения. Записи смещений представляют определённый интерес в инженерных решениях для оценки возможных длиннопериодных воздействий. Для построения вероятностных карт сейсмической опасности и для расчётов зданий на сейсмостойкость используются высокочастотные воздействия, представленные в виде акселерограмм и спектров реакции.

Из-за недостатка данных по ускорениям была сделана попытка перейти от смещений к ускорениям путём двойного дифференцирования при помощи программы OriginPro8 [3]. Имея записи одних и тех же событий приборами СМР и ССРЗ, можно оценить погрешности такого перехода. Анализ результатов показал, что кроме нереально больших значений ускорений искажается и сама форма спектров. Следует принять, что перевод смещений в ускорения путём двойного дифференцирования не даёт нужных результатов. Из всех записей смещений для дальнейшего анализа мы отобрали несколько оцифрованных записей сильных землетрясений, которые при первом рассмотрении давали результаты, близкие к ожидаемым. Это записи Маркансуйского землетрясения 11 августа 1974 в 01 час. 13 мин. с $M = 7.3$ на станциях «Арал», «Арсланбоб», «Суфи-Курган», его афтершока 11 августа в 20 час.05 мин. с $M=5.8$ на станциях «Арсланбоб» и «Суфи-Курган» и записи Дараут-Курганского землетрясения 1 ноября 1978 г. в 19 час. 48 мин. с $M = 6.8$ на станции «Дараут-Курган».

К переходу от скоростей к ускорениям следует подойти с большой осторожностью. На рисунке 3 приведена акселерограмма Суусамырского землетрясения 1992 г. с $M = 7.3$, записанная прибором ССРЗ на сейсмической станции «Фрунзе», расположенной на расстоянии 118 км от эпицентра. Запись необычна. На второй секунде зарегистрирован высокочастотный импульс с большой (относительно самой записи) амплитудой. Что это – явление в очаге или сбой аппаратуры? Зарегистрированное максимальное ускорение 73.6 см/с^2 находится в пределах ожидаемых значений на эпицентральной расстоянии 118 км и при магнитуде землетрясения $M = 7.3$ [4].

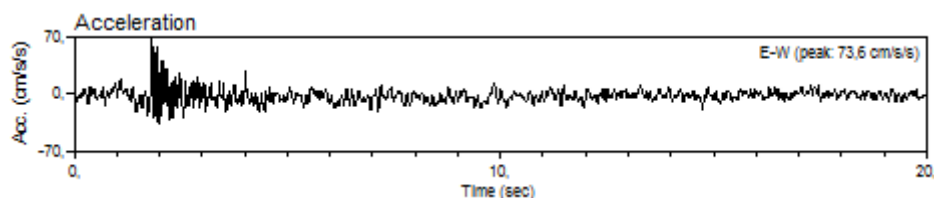


Рисунок 3. Запись Суусамырского землетрясения 1992 г. прибором ССРЗ (компонента В-З).

Акселерограмма Суусамырского землетрясения на той же станции «Фрунзе», полученная на основе записи велосиграфа С5С+ИСО-II и последующей её дифференциации, имеет стандартный вид (рисунок 4). Максимальная амплитуда колебаний наблюдалась в поперечной волне и по величине ($A = 62.6 \text{ см/с}^2$) близка к амплитуде ускорений по записи прибора ССРЗ.

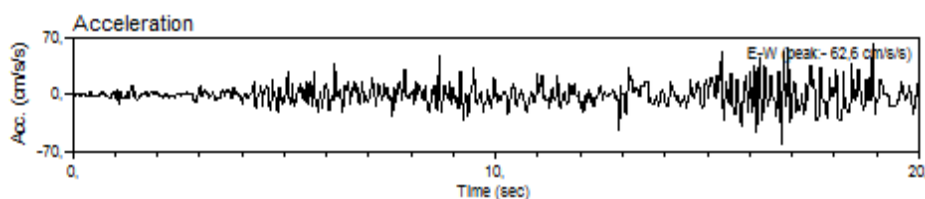


Рисунок 4. Запись Суусамырского землетрясения 1992г. прибором С5С+ИСО-II (компонента В-З).

Спектры реакции этих двух записей одного и того же землетрясения на одной станции разными приборами в какой-то мере близки по форме и уровню, но, естественно, будут сдвинуты относительно друг друга по оси периодов. Максимальные амплитуды в спектре по записи акселерографа наблюдаются на периоде 0.048 сек, по записи велосиграфа – на периоде 0.115 сек. (рисунок 5).

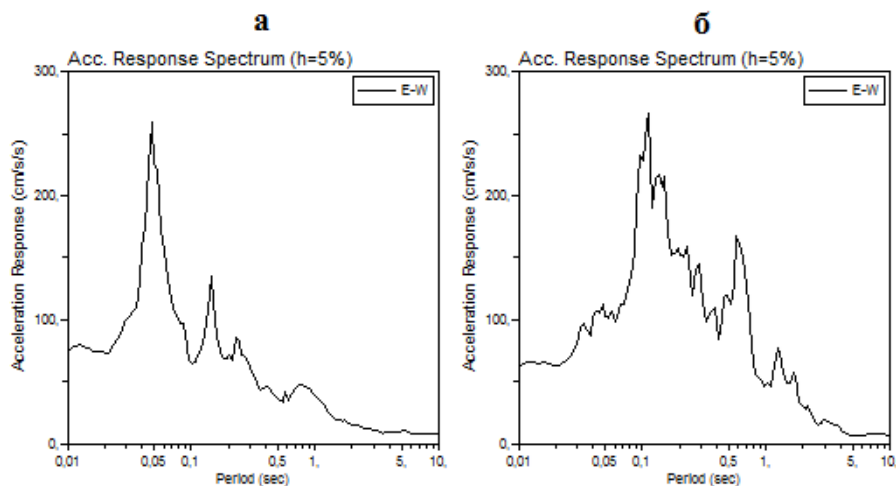


Рисунок 5. Спектры реакции ускорений Суусамырского землетрясения 19 августа 1992 года: а – по записи акселерографа ССРЗ, б – по записи велосиграфа С5С+ИСО-II.

Можно предположить, что на второй секунде записи акселерографа была зарегистрирована высокочастотная ударная волна, которую, в силу своей конструкции, не мог записать велосиграф. Результаты наблюдений в эпицентральных зонах сильных событий показывают, что очень часто максимальные разрушения происходят в первые

секунды высокочастотного сейсмического воздействия и уже затем следуют более длиннопериодные резонансные колебания, которые только усиливают первые разрушения [5-7]. Возможно, на рисунке 3 записан сбой прибора, хотя на рисунке 4 этот импульс тоже слабо проявился, тем не менее, проблема существует. Сейсмическая аппаратура «не недооценивает» (не регистрирует?) величину огромных (до 2 g и более) высокочастотных ускорений, в результате которых, как бритвой, срезаются железобетонные колонны в эпицентральной зоне [5-7 и др.]. На последней карте сейсмического районирования территории Кыргызстана максимальные ускорения a отмечены, как $a \geq 0.4g$ при интенсивности 9 баллов и более [8]. В работе [4] ускорение при 9 баллах принято, в среднем, равным 0.7g.

Таким образом, попытки, в какой-то мере, восполнить недостаток данных по ускорениям путём пересчёта их от смещений дали отрицательный результат. Переход от скоростей к ускорениям происходит с меньшими погрешностями, но тоже не гарантирован от ошибок. В результате мы имеем всего четыре записи ускорений Суусамырского землетрясения, которые получены на пределе чувствительности приборов. Ближайшей к эпицентру была станция «Фрунзе» с её необычной записью (рисунок 3). Станции «Юрьевка» и «Аркит» расположены на расстояниях порядка 140 км, станция «Ош» – на расстоянии 186 км, т.е. в ближней зоне записей акселерограмм не получено. Результаты обработки акселерограммы на станции «Ош» с помощью программы ViewWave [9] показаны на рисунках 6 и 7.

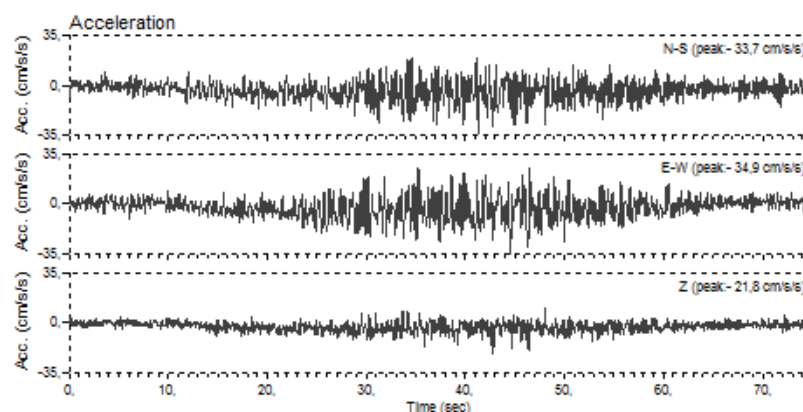


Рисунок 6. Акселерограммы Суусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. на станции «Ош».

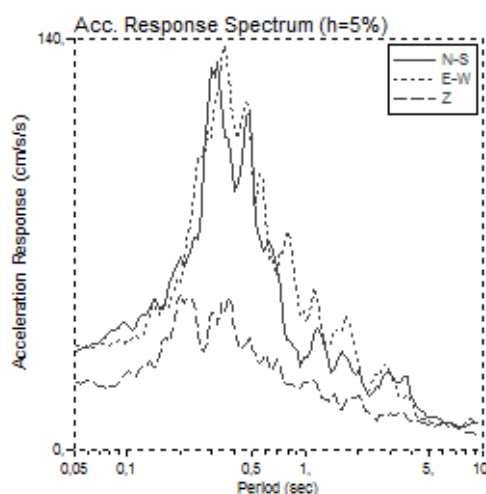


Рисунок 7. Спектры реакции ускорений по записям Суусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. на станции «Ош».

Максимальные ускорения на горизонтальных компонентах наблюдались в диапазоне периодов $\Delta T = 0.11\text{--}0.20$ с., на вертикальной компоненте – в диапазоне $\Delta T = 0.08\text{--}0.18$ с. (рисунок 7).

Сравнение наблюдаемых спектральных амплитуд SA_{obs} ускорений с моделями. Для построения вероятностной карты сейсмической опасности Кыргызстана, отвечающей современным требованиям строительных норм, необходимо иметь уравнение затухания ускорений колебаний грунта с расстоянием. Получить уравнение затухания на основе единичных записей ускорений, а также данных по ускорениям, пересчитанных от смещений и скоростей, не представляется возможным. Сделана попытка использовать эти отобранные наиболее качественные единичные записи сильных землетрясений для выбора закона затухания, полученного в других регионах. Для решения задачи рассмотрена исследовательская программа PEER NGA-West2, в которой в формате Excel представлены пять уравнений прогнозирования движения грунта [10]. Из пяти уравнений были использованы четыре: 1) Abrahamson-Silva-Kamai (2014) – ASK14, 2) Campbell-Bozorgnia (2014) – CB14, 3) Chiou-Youngs (2014) – CY14, 4) Idriss (2014) – I14. Кроме того, рассмотрены модели Akkar-Bommer (2010) [11], Zhao Y., et al. (2006) [12] и Zhao Y., et al. (2016) [13].

В качестве параметров использованы следующие данные: тип подвижки в очаге землетрясения, угол падения плоскости разрыва, эпицентрального и гипоцентрального расстояния, скорость поперечных волн на глубине 30 м под станцией.

1. Ускорения. Для сравнения с моделями были отобраны записи ускорений Суусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. с $M_w = 7.2$ на сейсмических станциях «Фрунзе» (FRU), «Аркит» (ARK), «Ош» (ОНН) и «Юрьевка» (YRV). Записи были представлены в виде спектров реакции с 5%-м затуханием от критического (программа Kashima T. [9]). Очаг Суусамырского землетрясения находился на глубине 27 км, тип подвижки – взброс, угол падения плоскости разрыва – 74° . Для всех этих станций было использовано приближённое значение $V_{S30} = 400$ м/с, исходя из категории грунтов.

Выбранные модели имеют близкие тенденции и меняют приоритет в зависимости от наблюдаемых данных. Но при этом надо дать предпочтение двум моделям: Akkar-Bommer_2010 [11] и Zhao et al._2016 [13]. Практически все наблюдаемые спектральные амплитуды SA_{obs} по записям ускорений на четырёх рассмотренных станциях лежат в пределах узкого доверительного интервала модели Akkar-Bommer_2010. В данном случае (рисунок 8) на малых периодах ($T \geq 0.2$ с.) наиболее близка к экспериментальным данным модель [13], на больших периодах – модель [11].

2. Скорости. Лучшее согласие между SA_{obs} и SA_{mod} получено по записям скоростей Суусамырского землетрясения 19.08.1992 г. на станции «Фрунзе» (рисунок 9). Для других записей скоростей экспериментальные точки на периодах $T < 5$ с. лежат выше всех семи рассмотренных моделей. В данном примере в приоритете находятся модели Zhao et al. (2016) и Akkar, Bommer (2010).

3. Смещения. Из шести рассмотренных записей лучшее согласие между наблюдаемыми SA_{obs} и модельными SA_{mod} значениями получено для афтершока Маркансуйского землетрясения 1974 г. на станции «Суфи-Курган» (рисунок 10).

Для остальных записей максимумы наблюдаемых величин SA_{obs} на периодах $T \leq 1$ сек значительно превышают модельные значения. В данном случае в приоритете находятся модели Zhao et al (2016) и Akkar, Bommer (2010).

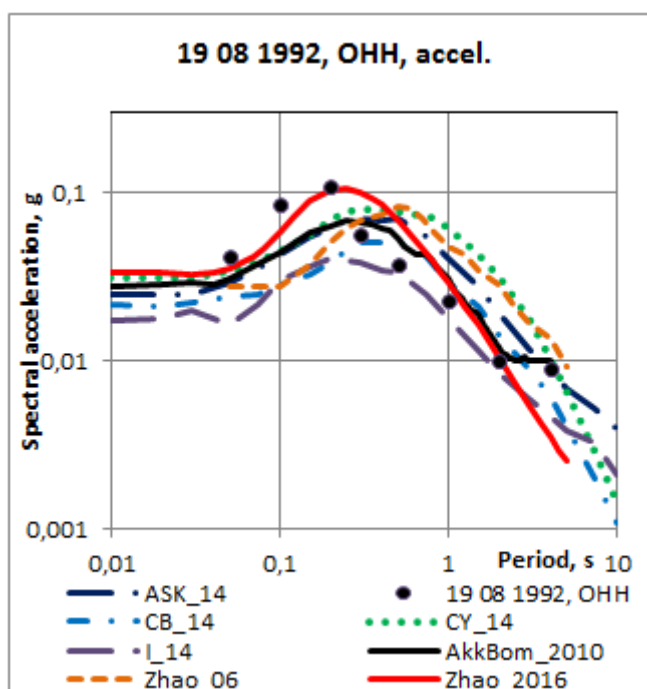


Рисунок 8. Спектральные кривые семи моделей и наблюдаемые данные SA_{obs} по записям станции «Ош».

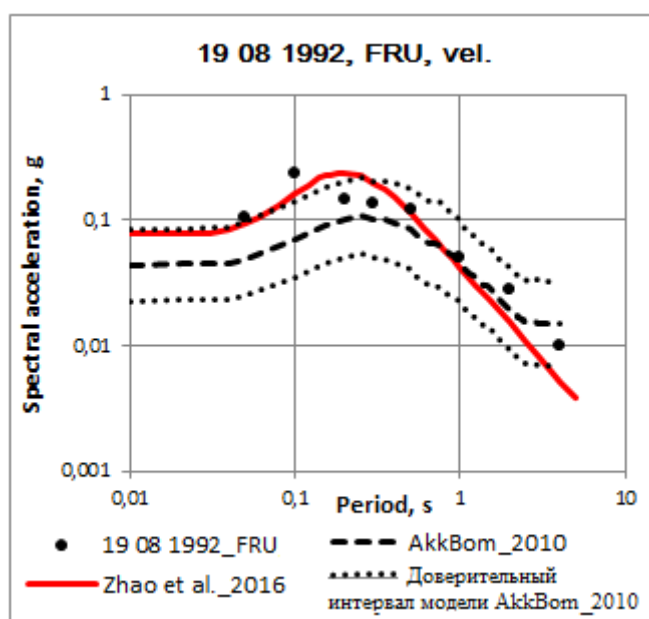


Рисунок 9. Спектральные кривые моделей и наблюдаемые данные SA_{obs} по записям скоростей Суусамырского землетрясения на станции «Фрунзе».

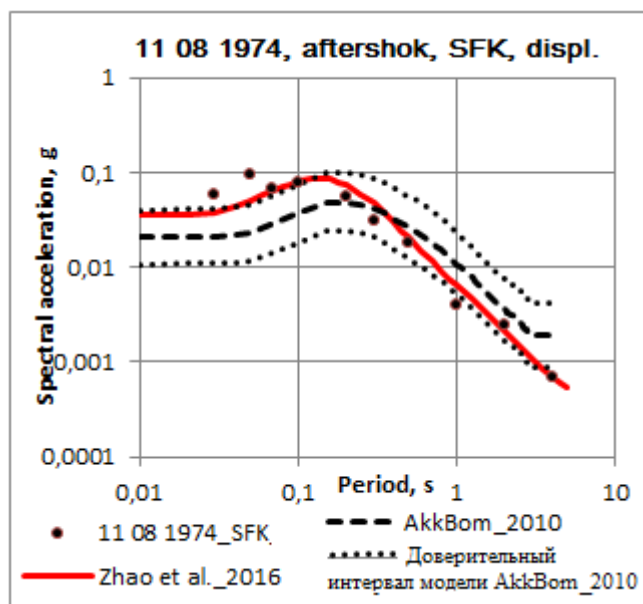


Рисунок 10. Спектральные кривые моделей и наблюдаемые данные SA_{obs} по записям смещений на станции «Фрунзе».

Выводы

Выбор закона затухания пиковых ускорений грунта на основании записей сильных землетрясений является одной из составных задач оценки сейсмической опасности. В Кыргызстане аналоговые приборы для регистрации сильных движений находились в рабочем режиме с 1970 г. по 2008 г. За этот период зарегистрировано 130 землетрясений. Записи нескольких сильных землетрясений характеризуются значительной удалённостью станций от очага. Большая часть аналоговых записей представлена смещениями колебаний грунта. Попытка восполнить единичные данные по ускорениям путём дифференцирования записей скоростей и смещений не дала нужных результатов. На смену аналоговой сети Кыргызстана пришла цифровая сеть наблюдений, но в ближней зоне записей сильных событий пока не получено. На основании имеющихся данных построить региональное уравнение затухания ускорений грунта не представляется возможным.

Другой путь решения этой проблемы заключается в выборе закона затухания, полученного в другом регионе, и оценке соответствия этого закона наблюдаемым данным. С этой целью рассмотрено семь моделей затухания спектральных ускорений. Анализ показал, что для оценки сейсмической опасности территории Кыргызстана можно рекомендовать с одинаковым весом две модели затухания: Zhao et al. (2016) и Akkar, Bommer (2010). Первая модель лучше других моделей отражает наблюдаемые данные на высоких частотах. По записям ускорений наблюдаемые данные, за небольшим исключением, лежат внутри узкого доверительного интервала второй модели.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Международного научно-технического центра (грант МНТЦ ISTC #KR 2398).

Литература

1. Фролова А.Г., Першина Е.В., Шукурова Р. Спектры реакции по записям землетрясений Кыргызстана Известия НАН КР. Бишкек: Илим, 2012. С.56-61.
2. Программа Wave Track, версия 1. Оцифровка данных геофизических исследований скважин. Новосибирский региональный центр геоинформационных технологий. Новосибирск.1999-2000.
3. <http://www.OriginLab.com>.
4. Аптикаев Ф.Р. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. // М.: Наука и образование. 2012.175 с.
5. Павленко О.В. Ударная волна как возможный механизм генерации аномально высоких ускорений при землетрясении Тохоку 11 марта 2011 (M=9). [emsd.ru > pdf > seism > pavlenko](http://emsd.ru/seism/pavlenko/).
6. Ордобаев Б.С. О фундаментальной концепции сейсмостойкости и сейсмоустойчивости зданий при сильных землетрясениях. // Вестник КРСУ.2015.Том 15. № 9 С.133-137.
7. Смирнов С.Б. и др. Исследования аномальных форм в сейсмических разрушениях зданий, противоречащих официальной теории сейсмозащиты и опровергающих официальный взгляд на причины разрушения зданий при землетрясениях. // Объединенный научный журнал. М. 2008. С. 51–59.
8. Сайт Института сейсмологии НАН КР: seismo.kg.
9. Kashima T. ViewWave Help. – 2002. – IISEE, BRI.
10. NGAW2_GMPE_Spreadsheets_v5.7_041415_Protected.xlsm. University of California, Los Angeles CIVIL ENGI. 245 p.
11. Akkar S., Bommer J.J. Empirical equation for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East. March 2010. //Seismological research letters 81 (2). p.195-206.
12. Zhao et al. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. Bulletin of the Seismological Society of America 96(3). January 2006. P. 898-913.
13. John X. Zhao, Shuanglin Zhou, Jun Zhou Chen Zhao and others. Ground-Motion Prediction Equations for Shallow Crustal and Upper-Mantle Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions./Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 4, pp. 1552–1569, August 2016.

Рецензент: д. ф-м. н. А.М. Муралиев