

УДК 550.34

РЕГИСТРАЦИЯ И БАЗА ДАННЫХ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ НА КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЯХ ЯДЕРНОГО МОНИТОРИНГА

Соколов А.Н., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Приведены результаты исследования параметров записей сильных движений, зарегистрированных казахстанскими станциями ядерного мониторинга за 1997–2013 гг., а также северотяньшаньскими станциями сети Института сейсмологии МОН РК и Института сейсмологии НАН Кыргызстана за 1970–2010 гг. Проведено сравнение результатов наблюдений сильных движений с мировой зависимостью Абрахамсона-Сильвы. Получены поправки для территории Северного Тянь-Шаня и Джунгарии относительно мировой кривой затухания максимальных амплитуд ускорений.

ВВЕДЕНИЕ

В современной сейсмологии одной из самых актуальных задач является оценка сейсмических воздействий на инженерные сооружения, здания и окружающую среду. Особенно важно решение этой проблемы для Казахстана, так как юг и юго-восток республики, где расположен крупнейший город Алматы, находится в районах с интенсивностью сотрясений от 8 до 10 баллов. Кроме того в республике находится большое количество ответственных объектов, таких как исследовательские реакторы, хранилища радиоактивных отходов, гидросооружения и т.д., в будущем планируется строительство АЭС. Правильная оценка сейсмических воздействий при проектировании и эксплуатации столь ответственных объектов значительно влияет на снижение социально-экономического ущерба, причиняемого землетрясениями. Кроме того, изучение сильных движений очень важно и для научных исследований процессов в очагах сильных землетрясений, моделей затухания ускорений, скоростей, смещений.

СЕТЬ НАБЛЮДЕНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сеть станций РГП ИГИ, регистрирующих сильные движения, состоит из 6 станций, расположенных на юго-востоке (KNDC, PDGK), востоке (MAKZ, KURK), севере (BRVK) и в центральной части Казахстана (OTUK). В таблице 1 представлены параметры станций сильных движений, на рисунке 1 карта расположения станций.

Первая станция сильных движений сети РГП ИГИ начала свою работу в сентябре 1996 г., когда

на сейсмической станции IRISGSN в Маканчи был установлен акселерограф сильных движений FBA23. Постоянный мониторинг сильных движений в Центре данных ИГИ был начат с 2005 г. после установки прибора сильных движений на территории Центра данных (станция KNDC). За время работы станций сильных движений по результатам обработки были сформированы каталоги параметров сильных движений и соответствующих спектров реакции.

В настоящее время база данных в KNDC содержит информацию по 116 землетрясениям и 130 записям землетрясений (рисунок 2). Диапазон магнитуд m_b землетрясений составляет от 2.7 до 6.9, диапазон эпицентральных расстояний от 18 до 997 км. В базе данных есть события, зарегистрированные несколькими станциями, например, Торайгырское землетрясение 30 мая 2012 г. в Алматинской области [2], которое было зарегистрировано 5 станциями сильных движений (рисунок 3). Наибольшее количество записей имеется по станции KNDC, установленной в г. Алматы в Центре данных в 2005 г. Максимальное ускорение зарегистрировано при землетрясении 29 декабря 2007 г. с $m_b=4.5$ станцией KNDC на расстоянии 26 км от очага, $A_{max}(NS)=33.9 \text{ см/с}^2$.

На рисунке 4 представлено распределение по магнитудам и расстояниям всех полученных записей сильных движений сети РГП ИГИ. Из рисунка видно, что практически отсутствуют данные о сильных движениях землетрясений с большими магнитудами на близких расстояниях, необходимые для прогноза воздействий.

Таблица 1. Параметры станций сильных движений сети РГП ИГИ РК

| Код станции | Широта, N | Долгота, E | h, м | Название станции | АЦП | Акселерометр | Частота оцифровки, Гц |
|-------------|-----------|------------|------|------------------|-------|---------------|-----------------------|
| BRVK | 53.0580 | 70.2828 | 315 | Боровое | Q330 | FBA23 | 1 |
| KNDC | 43.2172 | 76.9658 | 900 | KNDC | DM-24 | CLA200 | 40 |
| KURK | 50.7154 | 78.6202 | 184 | Курчатов | Q330 | FBA23 | 1 |
| MAKZ | 46.8080 | 81.9770 | 600 | Маканчи | Q330 | FBA-ES-Episor | 40 |
| OTUK | 48.2445 | 72.3378 | 602 | Ортау | DM-24 | CMG5T | 100 |
| PDGK | 43.3276 | 79.4849 | 1290 | Подгорное | DM-24 | CMG5T | 100 |

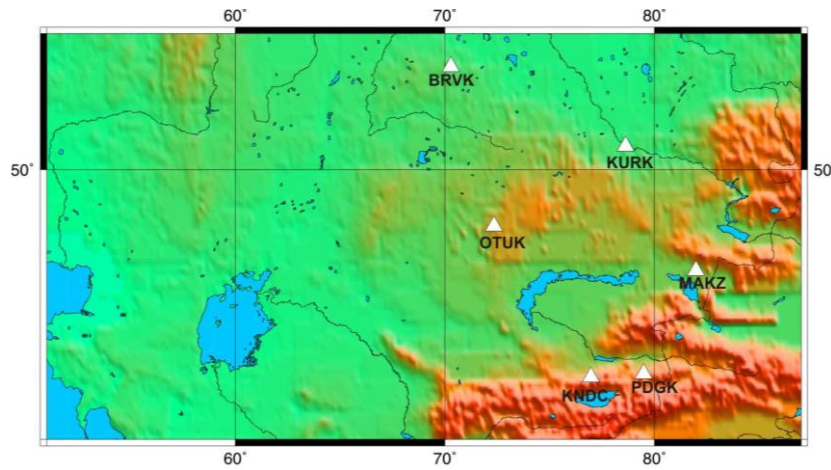


Рисунок 1. Карта расположения станций сильных движений сети РГП ИГИ

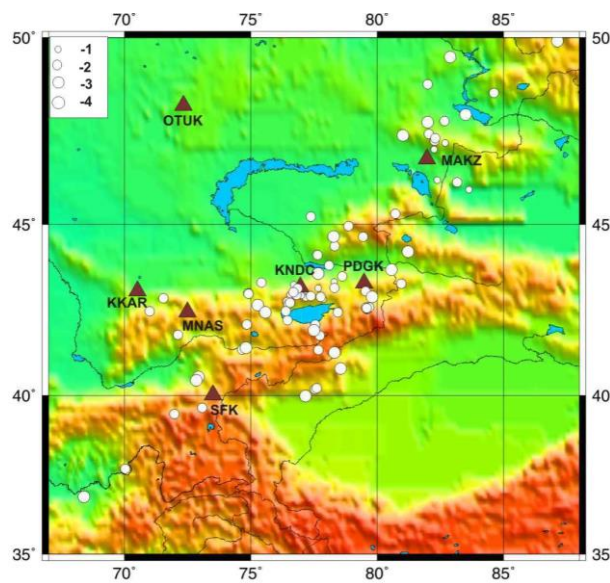


Рисунок 2. Карта расположения эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных сетью станций сильных движения ИГИ за период 1997–2013 гг., с магнитудами: 1 – $mb < 4$, 2 – $4 \leq mb < 5$, 3 – $5 \leq mb < 6$, 4 – $mb \geq 6$

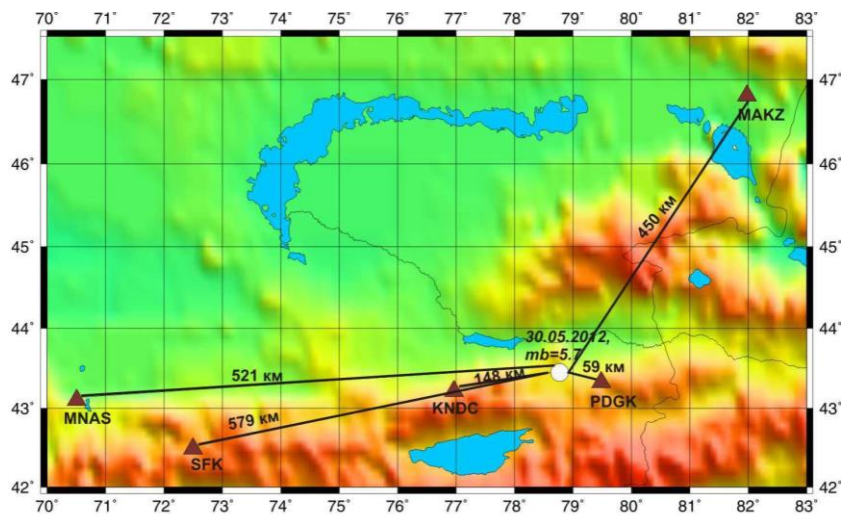


Рисунок 3. Станции регистрации Торайгырского землетрясения в Алматинской области 30 мая 2012 г. $mb=5.7$

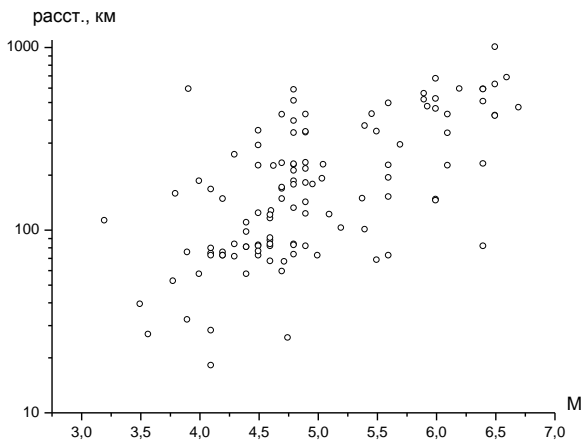


Рисунок 4. Распределение записей сильных движений по магнитудам и расстояниям

Имеющаяся выборка демонстрирует скоррелированность значений расстояний и магнитуд: все сильные землетрясения зарегистрированы, как правило, на больших расстояниях, а на малых расстояниях имеются записи только слабых событий. Это распределение свидетельствует о том, что получить надежную зависимость для затуханий максимальных ускорений только по данным исследуемого региона пока невозможно.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И БАЗА ДАННЫХ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Обработка данных сильных движений существенно отличается от рутинной обработки сейсмических событий в Центре данных [3]. Рутинная обработка данных происходит в несколько этапов: обнаружение вступлений и определение параметров сигнала; автоматическая локализация событий; срочная обработка сильных событий; оставление оперативного бюллетеня, составление совместного с СОМЭ МОН РК бюллетеня для территории Центральной Азии. Для определения динамических и кинематических параметров сейсмических событий производится расстановка времен вступлений основных сейсмических фаз, замеры максимальных амплитуд, $f-k$ анализ для сейсмических групп, после чего производится локализация события, определяются координаты, глубина, время в очаге, магнитуда и энергетический класс.

Обработка данных сильных движений направлена на изучение параметров записей ускорений, скоростей, смещений (то есть воздействий во временной области), а также параметров воздействий в спектральной области. Для этого необходимо производить с записью различные преобразования: интегрировать, дифференцировать записи, рассчитывать спектр Фурье и спектр реакции, оценивать параметры спектров.

Ниже приведены этапы обработки записей сильных движений в практике Центра данных.

1. Для анализа сильных движений выбираются события, которые ощущались на территории Казахстана, а также землетрясения вблизи сейсмических станций, которые были зарегистрированы приборами сильных движений, формат данных CSS3.0.

2. С помощью программы DSP_Java производится визуализация события, цифровая запись в формате CSS3.0 переводится в текстовый вид – ASCII.

3. Далее производится обработка текстового файла для приведения условных значений в физические характеристики колебаний грунта, размерность $\text{см}/\text{с}^2$ с учетом АЧХ приборов. Проводится корректировка за нулевую линию. Если это необходимо, то производится дифференцирование записи для перевода записи, например, велосиграфа в акселерограмму.

4. При помощи программного обеспечения ViewWave, разработанного Т. Кашимой [4], которое позволяет проводить визуализацию записи, откалиброванной за характеристики прибора в физических единицах, производится расчет спектра Фурье и спектра реакции для разных значений затухания, дифференцирование и интегрирование записей. Спектр реакции представляется в тройном логарифмическом масштабе, что позволяет анализировать одновременно три кинематических параметра.

На рисунке 5 представлен пример обработки записи и спектры реакции землетрясения 28.01.2013 г. в 16:38 по станции PDGK.

Несмотря на то, что база данных сети сильных движений ИГИ постоянно пополняется, данных для изучения закона затухания амплитуд сильных движений недостаточно. В связи с этим, была проведена большая работа по сбору данных по параметрам сильных движений по станциям, расположенным на территории Северного Тянь-Шаня по литературным данным [5, 6, 7]. Были собраны данные по 760 записям сильных движений, зарегистрированных как аналоговой, так и цифровой аппаратурой с 1970 по 2010 гг., диапазон расстояний составил от 5 до 1220 км, диапазон магнитуд MLH от 2.3 до 7.5.

На рисунке 6 приведена схема базы данных сильных движений, в состав которой вошли:

1. База данных сильных движений сети РГП ИГИ, (1997–2013), составленная по цифровым данным приборов сильных движений [1].

2. Каталог параметров сильных движений ИС МОН РК (1970–1995), составленный Михайловой Н.Н. по оцифрованным аналоговым записям сети станций сильных движений, установленных на территории Северного Тянь-Шаня [5, 6].

3. База данных сильных движений г. Алматы ИС МОН РК (2000–2010), составленная по цифровым данным станций сильных движений, расположенных на территории г. Алматы [7].

4. Каталог параметров сильных движений (1970–2005), созданный в рамках проекта CASRI по данным Центрально азиатских станций.

Созданная база данных явилась объединением всех данных в унифицированном формате (рисунок 7). В объединенной базе данных содержится 890 за-

писей сильных движений, максимальное ускорение было зарегистрировано станцией Курменты на расстоянии 35 км от эпицентра Байсорунского землетрясения 12 ноября 1990 года с $MLH=6.4$, $A_{max}=675 \text{ см/с}^2$.

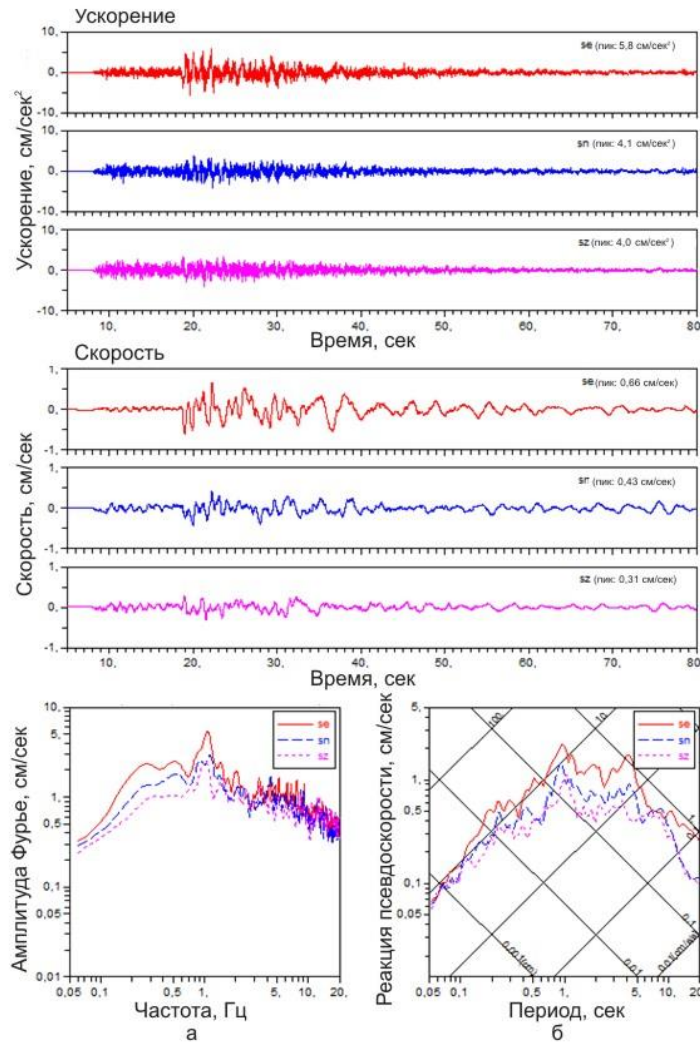


Рисунок 5. Записи и спектры реакции землетрясения 28.01.2013 г. в 16-38-53.8 (станция PDGK), а – спектр Фурье, б – спектр реакции псевдоскорости

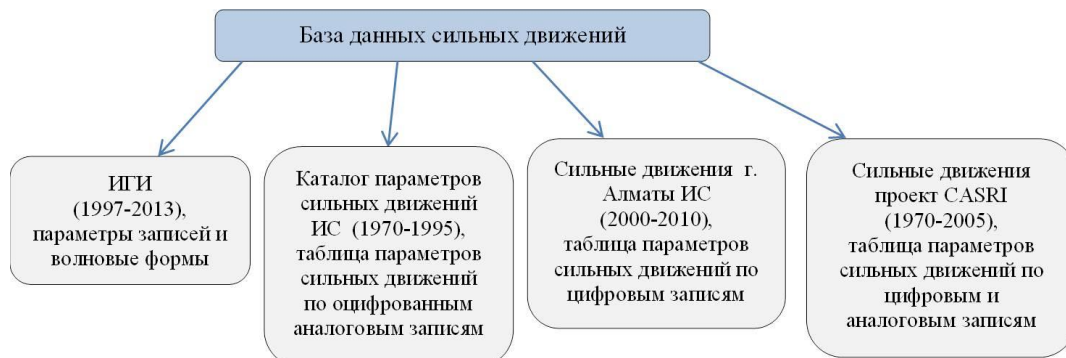


Рисунок 6. Схема базы данных сильных движений

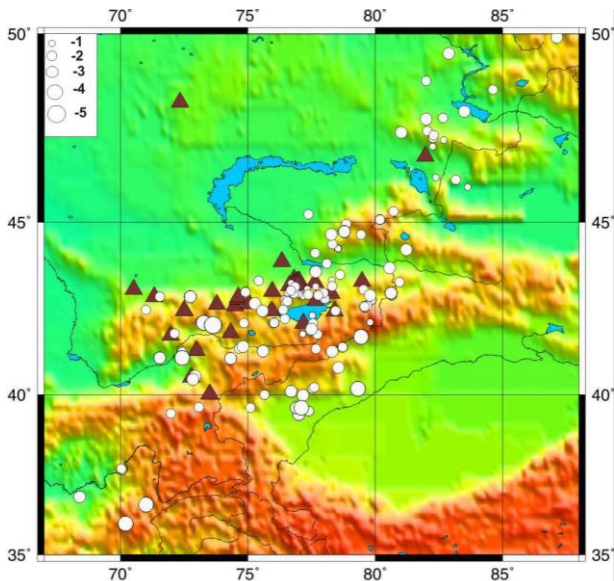


Рисунок 7. Карта расположения эпицентров сейсмических событий, вошедших в объединенную базу данных сильных движений, за период 1970-2013 гг., с магнитудами: 1 – $mb < 4$, 2 – $4 \leq mb < 5$, 3 – $5 \leq mb < 6$, 4 – $6 \leq mb < 7$, 5 – $mb \geq 7$

На рисунке 8 представлено распределение всех записей созданной базы данных по расстояниям и магнитудам.

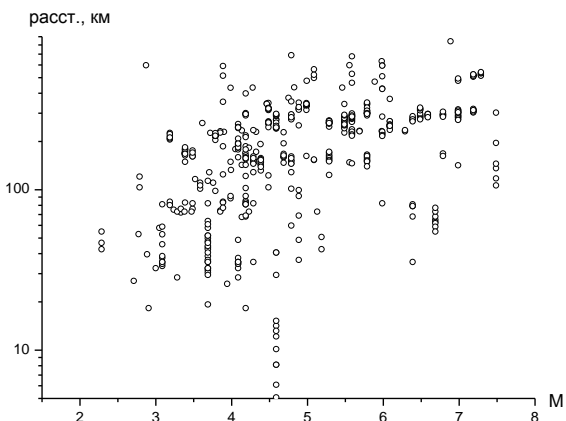


Рисунок 8. Распределение по магнитудам и расстояниям акселерограмм землетрясений Северного Тянь-Шаня и Джунгарии

МОДЕЛЬ ЗАТУХАНИЯ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Для оценки воздействий землетрясений на объекты в настоящее время существует две возможности: это теоретический прогноз сейсмических воздействий, который в настоящее время реализовать практически невозможно ввиду того, что строение и свойства среды на трассе распространения сигнала, как правило, не очень хорошо изучены, кроме того очаги сильных землетрясений имеют сложное строение. В связи с этим, более перспективным является использование эмпирического прогноза, с использованием записей колебания грунта на площад-

ке сооружаемого объекта. Для использования этого метода необходимо знать модель затухания амплитуд сильных движений, которая дает возможность рассчитать воздействие для заданной магнитуды, механизма очага, расстояния до сейсмогенерирующего разлома.

На рисунке 9 представлен один пример затухания максимальных амплитуд ускорений для станций сети сильных движений РГП ИГИ для Нарынкольского землетрясения 28.01.2013. Только большая статистика данных подобного рода поможет получить эмпирическое уравнение затухания для данного района, то есть представить зависимость уровня колебаний от магнитуды, расстояния, параметров очага и грунтовых условий. Такую зависимость называют моделью затухания ускорений.

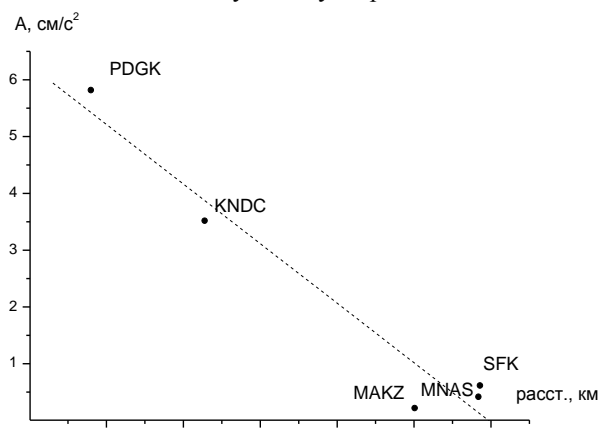


Рисунок 9. Затухание максимальных амплитуд ускорений для станций сети сильных движений РГП ИГИ, Нарынкольское

Согласно рисунку 8, собранных за 43 летний период данных по сильным движениям для Северного Тянь-Шаня и Джунгарии для построения собственной модели затухания безусловно недостаточно. Практически отсутствуют данные о сильных движениях землетрясений с большими магнитудами на близких расстояниях, а также событий с магнитудами менее 4.5 на удаленных расстояниях. В подобных случаях обычно подбирают наиболее подходящую для условий данного региона мировую модель затухания, т.е. модель, построенную на данных представительной выборки по ряду районов, где имелось много станций сильных движений и достаточное количество зарегистрированных ими землетрясений. В качестве примера была выбрана модель Абрахамсона-Сильвы 2008 г. [8]. Эта модель применима для магнитуд M_w от 5 до 8.5, расстояний 0-200 км и спектральных периодов 0-10 с. В связи с этим из нашей базы данных сильных движений были выбраны события, удовлетворяющие этим условиям.

Модель для медиан сильных движений задана уравнением:

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + a_{12}F_{RV} + a_{13}F_N + a_{15}F_{AS} + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, dip, Z_{top}, M) + f_5(PGA_{1100}, V_{S30}) + F_{RV}f_6(Z_{top}) + (1 - F_{RV})f_7(Z_{top}) + f_8(R_{rup}) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) \quad (1)$$

где: M – моментная магнитуда,
 R_{rup} – расстояние до разрыва,
 R_{jb} – расстояние Джойнера-Бура,
 R_x – горизонтальное расстояние до границы разрыва (измеренный перпендикуляр до простира-ния разлома),
 Z_{top} – глубина-верх разрыва,
 F_{RV} – индикатор для землетрясения с механизмом взброс,
 F_N – с механизмом сброс,
 F_{AS} – индикатор для афтершоков (1 для афтершоков, 0 для основных толчков, форшоков и роев),
 F_{HW} – индикатор для висячего блока,
 dip – угол падения разлома в градусах,
 V_{S30} – скорость распространения поперечных волн на глубине 30 м,
 $Z_{1.0}$ – глубина, для которой $V_s=1.0$ км/с,
 PGA_{1100} – медиана пиковых ускорений (g) для $V_{S30}=1100$ м/с,
 W – ширина разрыва в км.

Функционалы f_1 – f_{10} зависят от типа грунта под станцией, магнитуды, длины и глубины разрыва, а также фокального механизма землетрясения [8].

Указанный выше алгоритм реализован в виде программного обеспечения [9] и протестирован на данных по сильным движениям, зарегистрированным северотяньшаньскими и джунгарскими станциями. Из базы данных по сильным движениям были выбраны данные, удовлетворяющие условиям применимости модели Абрахамсона-Сильвы, произведены расчёты пиковых ускорений (PGA) согласно модели Абрахамсона-Сильвы, произведено сравнение полученных расчетных значений и наблюдаемых на станциях сильных движений. На рисунке 10 и 11 представлено распределение по расстояниям и магнитудам отношения расчетных согласно модели Абрахамсона-Сильвы (A_p) и наблюдаемых ускорений (A_n) для района Северного Тянь-Шаня и Джунгарии. На рисунке 12 представлено интегральное распределение значений логарифма отношений расчетных и наблюдаемых ускорений. Медиана логарифма отношений расчетных, и наблюдаемых ускорений составила 0,228. Это говорит о том, что прогнозируемые значения по выбранной модели незначительно (в среднем в 1.7 раза) превышают наблюдаемые ускорения. Требуется введение поправок в уравнение, либо продолжение тестирования других моделей, используемых в мировой практике.

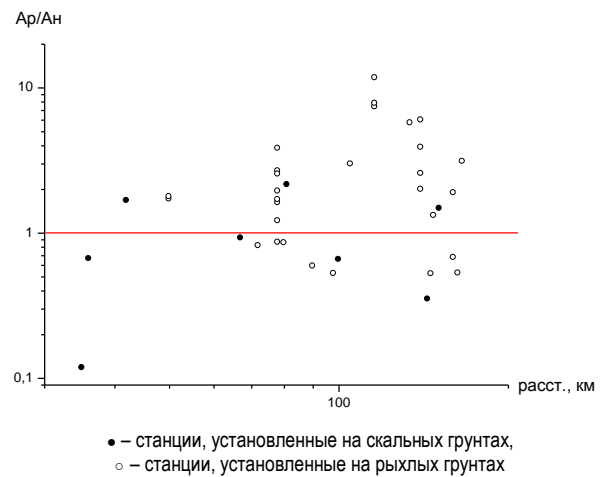


Рисунок 10. Распределение по расстояниям A_p/A_n для района Северного Тянь-Шаня и Джунгарии

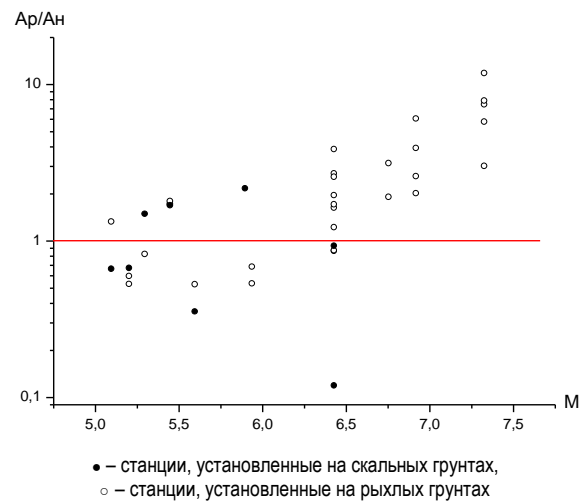


Рисунок 11. Распределение по магнитудам A_p/A_n для района Северного Тянь-Шаня и Джунгарии.

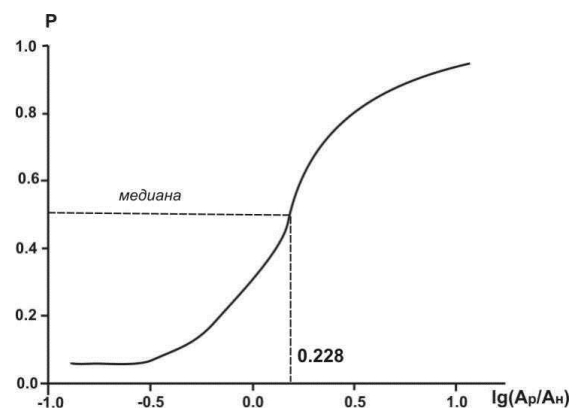


Рисунок 12. Интегральное распределение значений логарифма отношений расчетных, согласно модели Абрахамсона-Сильвы и наблюдаемых ускорений для района Северного Тянь-Шаня и Джунгарии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые создана база данных параметров сильных движений, в которой объединены данные разных организаций, разных приборов, за разные годы. На данный момент в ней содержится 890 записей за период 1970–2013 гг. на эпицентральных расстояниях от 5 до 1220 км. Имеющаяся информация свидетельствует о недостаточном развитии сетей сильных движений в Казахстане, невозможности получить по ним региональной зависимости для прогноза сейсмических воздействий.

2. Проведено сравнение результатов наблюдений сильных движений с мировой зависимостью

Абрахамсона-Сильвы, свидетельствующее о завышении (в среднем в 1.7 раза) расчетных по модели значений по сравнению с наблюдаемыми. Получена поправка для Северного Тянь-Шаня и Джунгарии для использованной модели затухания максимальных амплитуд ускорений.

3. Созданную базу данных и полученные результаты по тестированию модели следует учитывать как в методическом, так и в практическом аспекте при будущих работах по сейсмическому микро-районированию, при строительстве АЭС и хранилищ ядерных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов, А.Н. Использование данных по сильным движениям для прогноза воздействий на площадки строительства ответственных объектов / А.Н.Соколов, Р.Б. Узбеков // Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии. Доклады международной конференции молодых ученых и специалистов. 6–8 июня 2012 г.г. Алматы ИЯФ. С. 97–105.
2. Даугавет, В.П. Регистрация землетрясения 31.05.2012 г. станциями инженерно-сейсмометрической службы города Алматы / В.П. Даугавет, В.А. Лапин // Сборник материалов IV Межд. научно-практ. конф. – Алматы, 2012. – С. 178–182.
3. Михайлова, Н.Н. Организация обработки данных в Центре специальной сейсмической информации ИГИ НЯЦ РК / Н.Н.Михайлова, З.И. Синева // Докл 2-го Казахстанско-Японского семинара по предотвращению последствий разрушительных землетрясений. 23–25 сентября 2002 г. С. 301–306. Алматы, 2003.
4. Kashima T. 2002. ViewWaveHelp, ISEE, BRI.
5. Михайлова, Н.Н. Каталог основных и спектральных параметров сейсмических воздействий по сильным землетрясениям Казахстана (1970–1992 гг.) // Алматы. ИС МОН РК. 76 с.
6. Михайлова, Н.Н. Сейсмическая опасность в количественных параметрах сильных движений грунта (на примере г. Алматы). // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва. 1996. 338 с.
7. Абаканов, Т. ред. Каталог параметров движений грунта по данным цифровой сети станций сильных движений на территории г. Алматы за 2000-2010 г. // Алматы. 2011. ИС МОН РК. – 136 с.
8. Abrahamson, N. A. Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground-motion relations. / N.A. Abrahamson, W. J. Silva // Earthquake Spectra, 2008. – 24: 67–97.
9. Интернетресурс Next Generation Attenuation (NGA) Models: http://peer.berkeley.edu/ngawest/nga_models.html

**ЯДРОЛЫҚ МОНИТОРИНГТІҢ ҚАЗАҚСТАНДЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫНДА
ҚАТТЫ ҚОЗҒАЛЫСТАРДЫ ТІРКЕУ МЕН ДЕРЕКТЕР БАЗАСЫ**

Соколов А.Н., Михайлова Н.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатов, Қазақстан

Ядролық мониторингтің қазақстандық станцияларымен 1997–2013 ж.ж., сонымен қатар ҚР БҒМ Сейсмология институтының және Қырғызстанның ҰҒА Сейсмология институтының солтүстіктяньшандік станцияларымен 1970–2010 ж.ж. тіркелген қатты қозғалыстар жазбаларының параметрлерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Абрахамсон-Сильва дүниежүзілік байланысымен қатты қозғалыстарды байқаудың нәтижелерін салыстыруы жүргізілген. Үдеудің максмаль амплитудалары басылу қисығына қатысты Солтүстік Тянь-Шань мен Жоңғартау аумағы үшін түзетулері алынған.

**RECORDS OF STRONG MOTIONS BY KAZAKHSTAN STATIONS
OF NUCLEAR MONITORING AND ITS DATABASE**

A.N. Sokolov, N.N. Mikhailova

Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan

The parameters of strong motions recorded by the IGR nuclear monitoring stations in 1997–2013 and by North Tien Shan stations of IS MES RK and IS NAS KR in 1970–2010 were investigated. The results of strong motions observation were compared with world dependence of Abrakhamson-Silva. The corrections on the world attenuation curve of maximum acceleration amplitudes were received for Northern Tien Shan and Dzhungariya.