

Б. Г. Пустовитенко, Е. А. Мержей

К прогнозу ожидаемых сейсмических воздействий от сильных землетрясений Крыма

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

Описан новый подход к моделированию прогнозных сейсмических воздействий (акселерограмм) от сильных землетрясений Крыма с учетом региональных сеймотектонических условий. Разработанная методика основана на использовании статистических свойств динамических и кинематических параметров сейсмических волн и очагов совокупности местных землетрясений.

Прогноз ожидаемых сильных сейсмических воздействий в виде временной функции ускорений колебания грунта (акселерограмм) является актуальной и практически значимой, но очень сложной задачей инженерной сейсмологии по обеспечению безопасности проживания в сейсмоактивных регионах.

Наиболее сейсмоактивным и сейсмоопасным в Украине является Крымский регион. Разрушительные и катастрофические землетрясения с интенсивностью в эпицентре $I_0 = 9-10$ баллов и проявлением на поверхности с $I_n = 8-9$ баллов возможны на всей территории Южного берега Крыма и Керченского полуострова с вероятностью не превышения расчетной интенсивности 90 и 95% при периоде повторяемости таких событий 1 раз в 500 и 1000 лет [1]. Прогнозная сейсмическая опасность отражена на картах общего сейсмического районирования ОСР-2004, которые являются основой строительных норм ДБН В.1.1-12 : 2006 Украины [2]. Данный нормативный документ регламентирует проектирование, строительство и реконструкцию зданий и сооружений в сейсмоопасных районах с учетом степени ответственности объектов. В частности, для нетиповых, особо ответственных и высотных зданий рекомендовано расчет нагрузок на сейсмическое воздействие выполнять прямым динамическим методом с использованием расчетных или реальных акселерограмм, инструментально зарегистрированных вблизи площадки строительства.

В Крыму, как по всей Украине, в последние годы все больше строится высотных нетиповых зданий (высота $h \geq 50$ м), для проектирования и проверки корректности расчетных схем сейсмостойкости которых обязательно необходимо иметь записи сильных движений грунта, ожидаемые в основании зданий при прогнозных землетрясениях расчетной интенсивности.

Инструментально зарегистрированных записей сильных движений грунта от сильных землетрясений Крыма в настоящее время не имеется, так как за период инструментальных наблюдений с 1928 по 2013 гг. в Крымско-Черноморском регионе не происходило разрушительных землетрясений, а более слабые сейсмические колебания записываются приборами по смещениям. Акселерометры для записи ускорений в регионе отсутствуют.

В сложившейся ситуации для выполнения требований нормативных документов и обеспечения устойчивости строительных объектов единственно возможным остается моделирование прогнозных акселерограмм с учетом специфики местных сеймотектонических условий. При этом важно отметить, что главными параметрами сейсмических воздействий, влияющих на интенсивность сотрясений и разрушительный эффект, являются не только

уровень сейсмических колебаний, но и спектральный состав колебаний и их продолжительность.

Известно несколько методов и подходов к расчету синтезированных акселерограмм [3]: использование инструментальных записей сильных движений грунта; теоретическое моделирование и полуэмпирический метод; расчет по стандартным спектрам (методы синтеза расчетных акселерограмм и спектров действия). Эти методы по разным причинам оказались неприемлемыми для Крыма. Возможен также выбор акселерограмм из базы мировых данных по признаку подобия геолого-геофизических условий. Однако применение и этого метода представляется некорректной задачей в силу многообразия факторов, влияющих на колебательный процесс, и неоднозначности подбора аналогичных геолого-геофизических условий.

Нами предложен новый подход и методика моделирования ожидаемых сейсмических воздействий методом масштабирования записи с использованием статистических свойств совокупности слабых толчков, позволяющие максимально полно учесть особенности региональных сеймотектонических и очаговых условий Крыма, а также свойства глубинной среды на пути очаг — станция регистрации.

Основные сейсмогенерирующие структуры, способные накапливать и сбрасывать напряжения в виде сильных землетрясений с максимальными магнитудами M_{\max} от 6,5 до 7,5, расположены в Черном море вблизи береговой зоны Крыма на расстояниях 20–40 км от крупных населенных пунктов и курортных комплексов, где в настоящее время интенсивно ведется строительство высотных и ответственных зданий (рис. 1) [4].

Очаги землетрясений расположены в земной коре на глубинах $h = 10\text{--}50$ км с преобладанием их числа на $h = (20 \pm 5)$ км [1]. Тип подвижек в очагах: взбросы, сбросы, сбросо(взбросо)-сдвиги [5].

Запись сейсмических колебаний от местных землетрясений Крыма осуществляется системой региональных сейсмостанций, расположенных в городах: Севастополь, Алушта, Ялта, Судак, Феодосия, Симферополь, Керчь (см. рис. 1). За период высокочувствительных инструментальных наблюдений (1955–2012 гг.) получены и обработаны более 3000 местных землетрясений, произошедших во всех сейсмогенерирующих структурах в широком диапазоне магнитуд M_w от 0,1 до 5,8 или энергетических классов по региональной шкале [6] соответственно $K_{\Pi} = 5\text{--}14$, с эпицентрными расстояниями от станций регистрации 5–350 км.

Результаты многолетних инструментальных исследований в Крыму показывают, что параметры и закономерности колебаний грунта при землетрясениях сильно отличаются друг от друга в зависимости от их интенсивности, эпицентрального расстояния, глубины очага, места их возникновения и станции регистрации. К настоящему времени в Крыму имеется представительная база данных о статистических свойствах, особенностях волновых форм и спектрального состава колебаний от местных землетрясений на каждой из региональных сейсмостанций. Благодаря обширной базе данных по слабым землетрясениям можно использовать два варианта решения задачи по моделированию акселерограмм: первый — это работа с индивидуальными “типичными” (характерными) записями, второй — статистический подход, требующий большого количества оцифрованных записей для последующих статистических оценок.

Нами выбран первый вариант с использованием установленных статистических свойств динамических параметров сейсмических волн и очагов местных землетрясений и закона подобия [7] между спектральными характеристиками слабых и сильных событий Крыма [8]. Как известно, закон подобия — это очень сильное сглаживание чрезвычайно разнообраз-

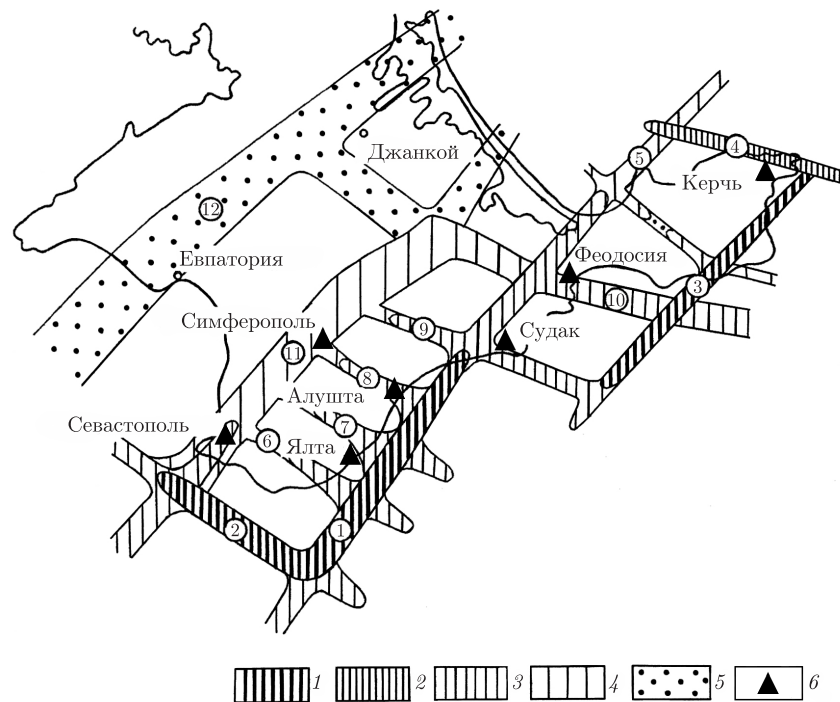


Рис. 1. Карта-схема сейсмогенерирующих структур Крымско-Черноморского региона [4]. 1 — $M_{\max} = 7$; 2 — $M_{\max} = 6,5$; 3 — $M_{\max} = 6$; 4 — $M_{\max} = 5$; 5 — $M_{\max} = 4$; 6 — сейсмические станции.

Цифры в кружках соответствуют нумерации сейсмогенерирующих структур: 1 — Южнобережная; 2 — Одесско-Синопская; 3 — Правдинская; 4 — Темрюкская; 5 — Южно-Азовская; 6 — Чернореченская; 7 — Ялтинская; 8 — Альминская; 9 — Молбайская; 10 — Крымско-Кавказская; 11 — Крымская; 12 — Донузлавская

ных индивидуальностей, потому важно выбрать преобладающую для региональных условий модель волновых форм и спектров сейсмических волн. При этом предполагается, что в пределах одной и той же сейсмогенной зоны (структуры) условия возникновения очагов землетрясений являются стационарными, т.е. соблюдается однотипность степени раздробленности среды, формирующая высокочастотную часть спектра, близость механизмов и размеров очагов одного ранга магнитуд. Отсюда следует общая методология и методика моделирования акселерограмм для крымских условий, которая заключается в следующем.

Свойства и характер сейсмических колебаний на станции регистрации обусловлены и предопределены в основном физическими процессами в очаге землетрясения, физико-механическими свойствами глубинной среды в очаговой зоне и на пути распространения сейсмических волн, направленностью излучения «очаг — станция», глубиной очага, инженерно-геологическими условиями под станцией (амплитудно-частотной характеристикой грунтовых условий), частотным диапазоном регистрирующего прибора. Следуя установленному закону подобия для очагов землетрясений Крыма [8], можно полагать, что сейсмические колебания на региональных сейсмических станциях от будущего сильного землетрясения, ожидаемого в данной сейсмогенной структуре, сохраняют в себе основные свойства совокупности более слабых сейсмических толчков, как в спектральной, так и во временной областях.

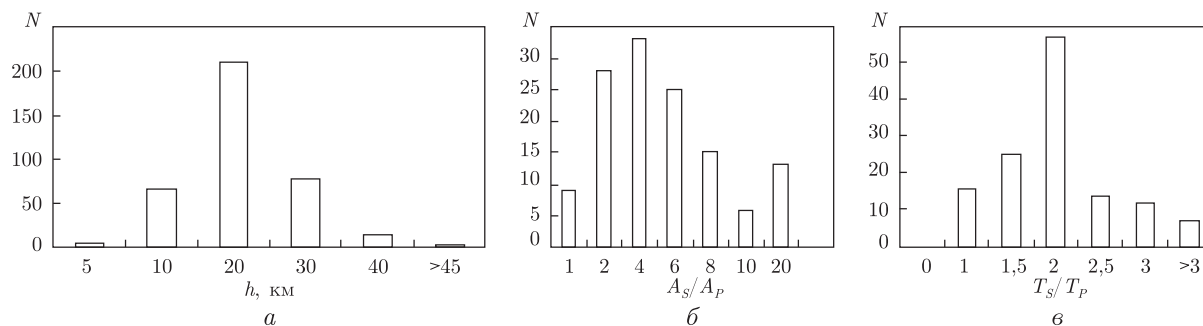


Рис. 2. Статистические закономерности распределения: *a* — глубин очагов в центральной зоне региона (Южнобережная зона); *б, в* — отношений амплитуд и периодов объемных сейсмических волн соответственно по станции “Симферополь”

В связи с этим **первым** (главным) этапом в нашем подходе является выбор наиболее типичных землетрясений с типичной записью, которая бы отвечала всем основным установленным статистическим свойствам совокупности изученных очагов.

Итак, основные критерии выбора типичного землетрясения и соответственно типичной записи:

1. Очаг землетрясения должен быть приурочен к основной сейсмогенерирующей структуре, ближайшей к объекту строительства и станции регистрации. Так, при проектировании объектов в городах Ялта и Алушта необходимо подбирать исходные (типичные) землетрясения, произошедшие в основной Южнобережной зоне и сопряженных с ней поперечных структур на эпицентральных расстояниях 10–40 км от сейсмических станций “Ялта” и “Алушта”, для г. Севастополь — в структуре Одесско-Синопского и Чернореченского разломов, а для г. Судак — в зоне Молбайского разлома и т. д. (см. рис. 1). Из рисунка видно, что вблизи крупных городов и курортных комплексов Крыма имеются сейсмогенерирующие структуры с высоким энергетическим потенциалом, а в самих городах расположены сейсмические станции для регистрации сейсмических колебаний от землетрясений.

2. Глубина очага землетрясения находится в диапазоне преобладающих глубин для данной геологической структуры. Пример для Южнобережной зоны дан на рис. 2, *a*.

3. Динамические параметры продольных (*P*) и поперечных (*S*) волн и отношения амплитуд A_S/A_P и периодов T_S/T_P на ближайшей к объекту станции регистрации соответствуют преобладающим долговременным значениям в функции их распределения. Например, на станции “Симферополь” для большинства землетрясений отношение амплитуд A_S/A_P находится в интервале от 2 до 6 при максимуме $A_S/A_P = 4$, а $T_S/T_P = 2$ (см. б, в на рис. 2).

4. Периоды T_P и T_S , относительная длительность максимальных сейсмических колебаний $\tau_{1/3}$, общая длительность записи землетрясения D на сейсмической станции отвечают полученным по экспериментальным данным долговременных зависимостей этих параметров от энергетического класса (K_{II}) или магнитуды (M_w): $T_P(K_{II})$, $T_S(K_{II})$, $\tau_{1/3}(K_{II})$, $D(K_{II})$ и попадают в интервал среднеквадратичных отклонений относительно линии их аппроксимации. Примеры экспериментальных зависимостей $D(K_{II})$ по станциям “Алушта” (1) и “Севастополь” (2), (3), рассчитанные по совокупности более 300 станционных замеров:

$$\lg D = (0,230 \pm 0,005)K_{II} - (0,25 \pm 0,03), \quad \rho > 0,95, \quad (1)$$

$$\lg D = (0,195 \pm 0,005)K_{II} - (0,095 \pm 0,030), \quad \rho > 0,95, \quad (2)$$

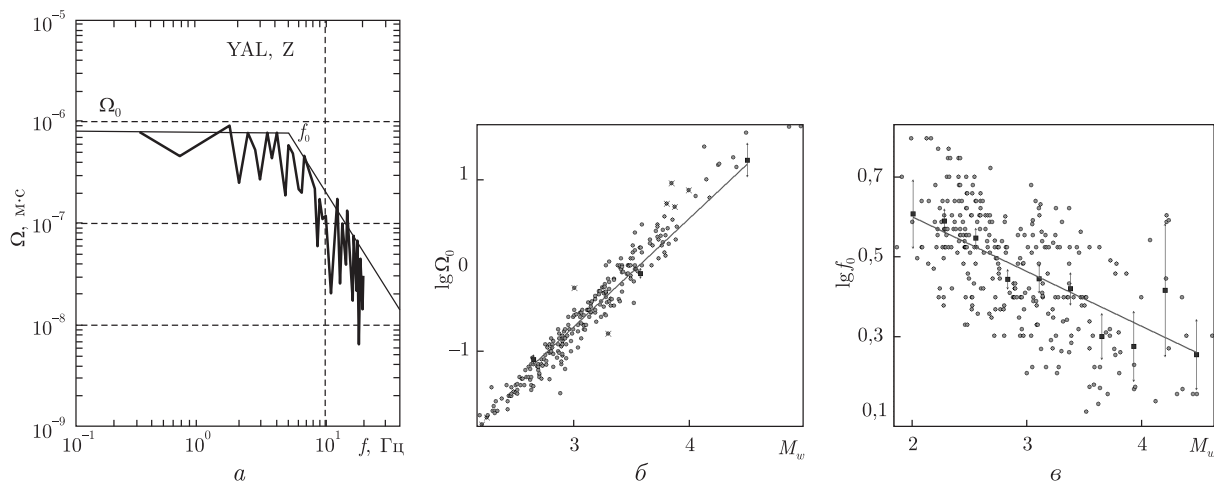


Рис. 3. Амплитудный спектр записи продольной волны P землетрясения 9 сентября 2011 г. с $K_{\Pi} = 9,7$, $h = 20$ км (сейсмостанция “Ялта”, эпицентрального расстояния 18 км) (а) и зависимости параметров амплитудного спектра: спектральной плотности Ω_0 (б) угловой частоты f_0 (в) от магнитуды землетрясения M_w

$$\lg \tau_{1/3} = (0,14 \pm 0,02)K_{\Pi} - (0,41 \pm 0,16), \quad \rho > 0,95. \quad (3)$$

5. Форма спада амплитуд колебаний со временем $A(t)$ и изменения периодов вдоль записи $T(t)$ не противоречат сводным огибающим и уравнениям регрессии для записей совокупности землетрясений по каждой станции отдельно. Приведем пример эмпирического уравнения для станции “Ялта”, полученного методом ортогональной регрессии с использованием 93 пары значений:

$$\lg T = (0,45 \pm 0,03) \lg t - (0,98 \pm 0,04), \quad \rho > 0,95.$$

6. Спектральный состав объемных P - и S -волн от типичного землетрясения подчиняется следующим требованиям: энергетический спектр имеет один ярко выраженный максимум [9]; амплитудный спектр истинного колебания соответствует дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) — с одной угловой частотой f_0 и резким спадом в высокочастотной части спектральной плотности $\Omega_0(f)$ при $f > f_0$ по квадратичному закону [10] (рис. 3, а).

7. Спектральная плотность Ω_0 в длиннопериодной части амплитудного спектра и угловая частота f_0 попадают в интервал среднеквадратичных отклонений относительно линии аппроксимации их долговременных корреляционных зависимостей от энергетического уровня землетрясений: $\Omega_0(K_{\Pi}, M_w)$ и $f_0(K_{\Pi}, M_w)$ для каждой станции регистрации (см. б, в на рис. 3).

Выбранные по перечисленным критериям записи типичных землетрясений из главной и ближайшей к объекту сопряженной структуры далее с помощью долговременных зависимостей спектральных, динамических и кинематических параметров сейсмических колебаний от энергии землетрясения: $\Omega_0(M_w)$ и $f_0(M_w)$ трансформируются в область прогнозного землетрясения с расчетными значениями интенсивности I_r и пикового ускорения A .

Рассмотрим последовательные этапы моделирования синтетической акселерограммы на примере реальной площадки в г. Ялта:

1) в качестве одной из типичных выбрана цифровая запись землетрясения с $M_w = 3,4$, произошедшего 7 февраля 2006 г. в 22 ч 58 мин 38,1 с в Южнобережной сейсмогенной зоне

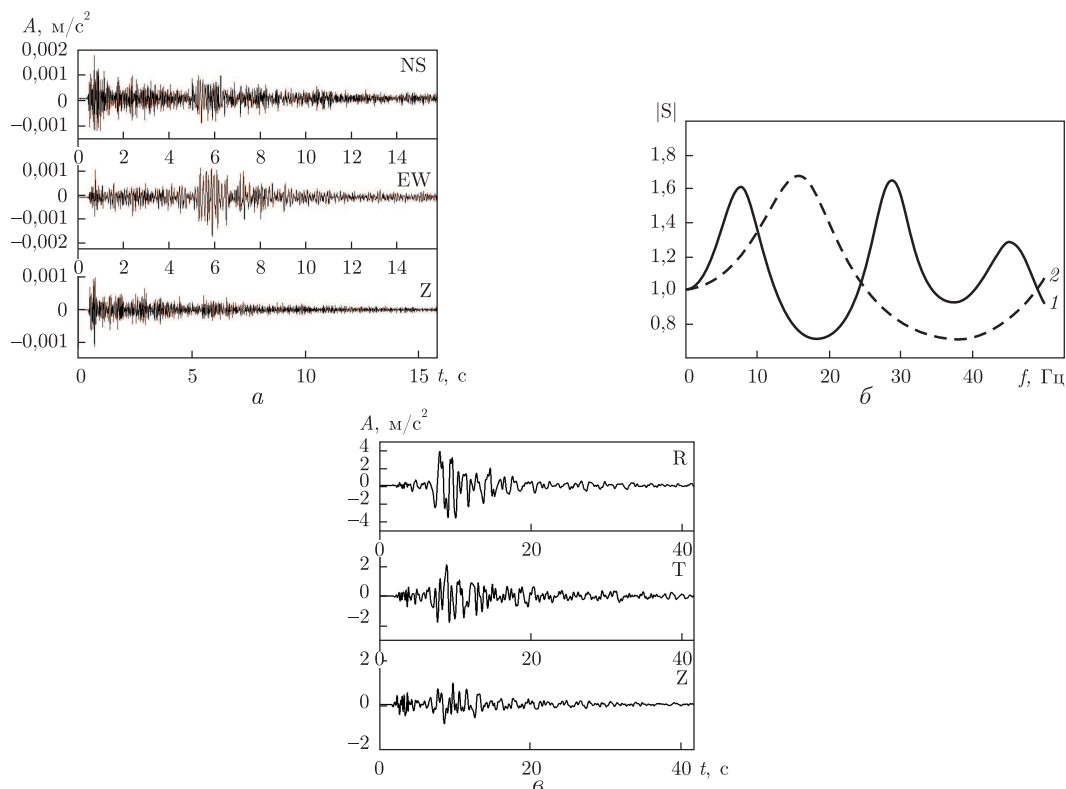


Рис. 4. Акселерограмма типичного землетрясения 7 февраля 2006 г., зарегистрированного на сейсмической станции “Ялта” (а); амплитудно-частотные характеристики среды на исследуемой площадке для объемных P - и SH -волн соответственно кривые 2 и 1 (б); акселерограмма прогнозируемых сейсмических колебаний грунта на исследуемой площадке для расчетной интенсивности воздействий $I_r = 8,36$ балла (в)

на глубине 13 км. Расстояние до сейсмической станции “Ялта” и исследуемой площадки соответственно составляет 13 и 14 км. Динамические и кинематические параметры выбранной сейсмической записи соответствуют перечисленным выше критериям;

2) путем численного дифференцирования типичная запись, приведенная к истинному колебанию грунта, преобразована в акселерограмму по компонентам NS, EW и Z (а на рис. 4). Далее, в соответствии с требованиями расчета сейсмических воздействий на объекты строительства [2, 11, 12], полученная акселерограмма перепроектирована в горизонтальной плоскости по направлениям: очаг — объект (радиальная составляющая R) и перпендикулярная ей тангенциальная составляющая T ;

3) с помощью быстрого преобразования Фурье рассчитан комплексный спектр ускорений, из которого исключено влияние передаточной характеристики верхних слоев грунта под сейсмической станцией “Ялта”;

4) используя зависимости для станции “Ялта” вида $\lg A = a + bM_w$, где A — динамический параметр (Ω_0 и f_0), a , b — постоянные коэффициенты, спектр трансформирован на магнитуду M_w , при которой сейсмические воздействия на площадке соответствуют расчетной интенсивности I_r , которая определяется по результатам специальных сейсмологических исследований;

5) по результатам инженерно-геологических изысканий и работ по сейсмическому микрорайонированию определено строение грунта под исследуемой площадкой [13], положен-

ное в основу расчета амплитудно-частотной характеристики среды (см. б на рис. 4) по алгоритму Ратниковой [14]. В итоге стационарный масштабированный спектр ускорений откорректирован с учетом передаточной характеристики среды под площадкой;

б) обратным преобразованием Фурье получена искомая синтетическая акселерограмма расчетного сейсмического воздействия (м/с^2) (нормированная на пиковое ускорение A , соответствующее расчетной интенсивности I_r) на исследуемой площадке строительства (см. в на рис. 4). Полученная акселерограмма для контроля правильности расчетов проверяется на соответствие эмпирическим зависимостям, свойственным типичным землетрясениям.

Описанный выше алгоритм моделирования ожидаемых прогнозных сейсмических воздействий от сильных землетрясений Крыма на основе статистических свойств спектральных и динамических параметров сейсмических колебаний совокупности более слабых сейсмических толчков реализован в специальном программном комплексе расчета акселерограмм для практического их использования при проектировании высотных и ответственных объектов строительства в Крыму [15].

1. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Борисенко Л. С., Поречнова Е. И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // Геофиз. журн. – 1999. – № 6. – С. 3–15.
2. Будівництво в сейсмічних районах України. ДБН В.1.1–12:2006. – Київ: Мінбуд України, 2006.
3. Штейнберг В. В., Сакс М. В., Антикаев Ф. Ф. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Задание сейсмических воздействий. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – Москва: Наука, 1993. – С. 5–94.
4. Борисенко Л. С., Пустовитенко Б. Г., Вольфман Ю. М., Дублянський В. Н., Новик Н. Н. Некоторые методические аспекты сейсмического районирования областей новейшего горообразования и сопредельных территорий (на примере Крыма) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – Москва: Б. и., 1995. – Вып. 2./3. – С. 27–45.
5. Пустовитенко А. А. Типы подвижек в очагах Черноморских землетрясений // Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища: Матеріали 6 Міжнарод. науч. конф., Київ, 2005. – С. 121–123.
6. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 2. – Москва, 1974. – С. 113–125.
7. Aki K. Scaling law of seismic spectrum // J. Geophys. Res. – 1967. – 72, No 4. – P. 1217–1231.
8. Пустовитенко Б. Г. О подобии очагов слабых и сильных землетрясений Крыма // Сучасні небезпечні процеси. Вплив на довкілля. Нові технології прогнозування та захисту: Матеріали 2 наук.-техн. конф. – НПП “Екологія. Наука. Техніка”. – Київ, 2004. – С. 59–61.
9. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наук. думка, 1990. – 251 с.
10. Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – 75, No 20. – P. 4997–5009.
11. Исичко Е. С. Методика расчета акселерограмм для конкретной строительной площадки // Bul. Inst. Seismologie al ASM. – 2007. – № 1. – P. 58–67.
12. Хачилян Э. Прикладная сейсмология. – Изд. ГИТУТЮН. НАН Республики Армения, 2008. – 491 с.
13. Федин М. М., Скляр А. М. Отчет “Сейсмическое микрорайонирование территории реконструкции зданий и сооружений танцевальной площадки “Дружба” в рекреационный комплекс по адресу: АРК, г. Ялта, парк Гагарина, 9” – фонды ООО “Южнобережный центр изысканий”. – Алушта, 2013.
14. Ратникова Л. И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. – Москва: Наука, 1973. – 124 с.
15. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Калинюк И. В., Мерзсей Е. А. Сравнительные характеристики акселерограмм, смоделированных для разных сеймотектонических условий // Сейсмостойк. стр-во. Безопасность сооружений. – 2012. – № 6. – С. 20–23.

Отдел сейсмологии Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины, Симферополь

Поступило в редакцию 28.10.2013

Б. Г. Пустовітенко, Є. О. Мержей

До прогнозу очікуваних сейсмічних дій від сильних землетрусів Криму

Описано новий підхід до моделювання прогнозних сейсмічних впливів (акселерограм) від сильних землетрусів Криму з урахуванням регіональних сейсмотектонічних умов. Розроблена методика заснована на використанні статистичних властивостей динамічних і кінематичних параметрів сейсмічних хвиль і вогнищ сукупності місцевих землетрусів.

B. G. Pustovitenko, E. A. Merjey

On the prediction of expected seismic impacts from strong earthquakes of the Crimea

A new approach to the modeling of predictive seismic effects (accelerograms) of strong earthquakes of the Crimea with accounting for the regional seismotectonic conditions is described. The developed technique is based on the statistical properties of the dynamic and kinematic parameters of seismic waves and seismic sources of the aggregate of local earthquakes.