

СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Construction and industrial safety
Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture

№ 14(66) – 2019

Основан в 1996 году.
Выходит 4 раза в год (ежеквартально)

Учредитель:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (КФУ им. В.И. Вернадского), 295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовым коммуникациям (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61830 от 18 мая 2015 г.

Включен в утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Индексируется в Российском индексе научного цитирования (**РИНЦ**)

Главный редактор

Федоркин Сергей Иванович, советник РААСН, д.т.н., проф.
(КФУ им.В.И. Вернадского)

Заместители главного редактора:

Любомирский Николай Владимирович, советник РААСН,
д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского)

Николенко Илья Викторович, д.т.н., проф. (КФУ
им. В.И. Вернадского)

Редакционная коллегия:

Абдулгасис У.А., д.т.н., проф. (КИПУ, Симферополь)

Бакаева Н.В., д.т.н., проф. (ЮЗГУ, Курск);

Бекиров Э.А., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь);

Беспалов В.И., д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону)

Ветрова Н.М., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь) – руководитель раздела «Экологическая
безопасность»;

Графкина М.В., д.т.н., проф. (МГМУ, Москва);

Гузнецков В.Н., д.пед.н., доц. (МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Москва);

Дворецкий А.Т., советник РААСН, д.т.н., проф. (КФУ
им. В.И. Вернадского, Симферополь);

Зайцев О.Н., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь) – руководитель раздела «Инженерное
обеспечение»;

Кукунаев В.С., советник РААСН, д.т.н., с.н.с. (КФУ им.В.И.
Вернадского, Симферополь);

Маилян Д.Р., советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-
на-Дону);

Нагаева З.С., советник РААСН, д.арх., проф. (КФУ
им. В.И. Вернадского, Симферополь) – руководитель раздела
«Градостроительство»

Несветаев Г.В., советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ,
Ростов-на-Дону);

Пишулина В.В., д.арх., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

Сергейчук О.В., д.т.н., проф. (КНУСА, Киев, Украина);

Серпокрылов Н.С., д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

Толстой М.Ю., к.т.н., доц. (ИРНИТУ, Иркутск);

Цопа Н.В., советник РААСН, д.э.н., проф. (КФУ им. В.И.
Вернадского, Симферополь);

Чемодуров В.Т., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь);

Чеботарев В.И., д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-на-Дону);

Шаленный В.Т., д.т.н., проф. (КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь) – руководитель раздела «Строительство»;

Шенна С.Г., советник РААСН, д.т.н., проф. (ДГТУ, Ростов-
на-Дону);

Щербаков В.И., д.т.н., доц. (ВГТУ, Воронеж)

СТРОИТЕЛЬСТВО И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

№ 14(66) – 2019

научно-технический журнал

Печатается по решению научно-технического
совета ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»
(протокол № 3 от 15.04.2019)

Координатор выпуска *И.В. Николенко*
Редактор *Н.А. Степанцова*
Корректор *А.Н. Нестерова*
Верстка *Г.Р. Биленко*

Редакция Академии строительства и
архитектуры (структурное подразделение)
ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

Адрес редакции: 95006, Республика Крым,
г. Симферополь, ул. Павленко, 3, корпус 2, к. 410,
e-mail: rio@napks.ru

Подписан в печать 17.04.2019.

Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Гарнитура Times New Roman. Усл. -печ. л. 19,0.

Тираж 100 экз.

Издатель: федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Крымский федеральный университет имени
В.И. Вернадского».

Издательство: ФГАОУ ВО «КФУ
им. В.И. Вернадского»
<http://cfuv.ru>, io_cfu@mail.ru
(3652) 60-84-98,

295007, Республика Крым, г. Симферополь, проспект
Академика Вернадского, 4, каб. 400Б

Отпечатано в типографии ФГАОУ ВО «КФУ
им. В.И. Вернадского»

295000, Республика Крым, г. Симферополь, бульвар
Ленина, 5/7

Распространяется по подписке.

Подписка по каталогу агентства «Роспечать».

Подписной индекс: 64974 (полугодовая).

Стоимость 1 экз. журнала 227,0 руб.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРИРОВАНИЯ АКСЕЛЕРОГРАММ СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ПРОЕКТИРУЕМЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В КРЫМУ

Пустовитенко Б.Г., Калинин И.В., Кульчицкий В.Е., Эреджепов Э.Э

- 1– ГАУ «Крымский экспертный совет по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений»
- 2- Институт сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, bpustovitenko@mail.ru

Аннотация. Изложена схема поэтапного решения задачи генерации акселерограмм сильных движений грунта в Крыму на примере площадки проектируемого строительства Крымского Государственного центра детского театрального искусства в г. Симферополе. Применен метод моделирования акселерограмм, основанный на подобию статистических свойств слабых и сильных местных землетрясений. Используются зависимости динамических и спектральных характеристик сейсмических волн, а также очагов землетрясений Крыма от энергетического уровня. Исходя из свойства фрактальности сейсмических процессов, постулируется закон подобия их характеристик. Экстраполяция зависимостей на большие магнитуды позволяет создать "образ" синтезированной акселерограммы сильного землетрясения. Основой для расчетов служили сейсмограммы сейсмической станции "Симферополь" землетрясений с магнитудами $M_w=2.8-3.5$, которые произошли в ближайших сейсмогенерирующих структурах Крыма на расстояниях 30 и 58 км от объекта строительства. Проведен спектральный, спектрально-временной и энергетический анализ акселерограмм. Получены интервалы значений спектральных характеристик, представляющих наибольшую опасность для сооружения

Предмет исследования. Сейсмические воздействия сильных землетрясений на здания и сооружения.

Материалы и методы. Записи реальных «типичных» сейсмограмм местных землетрясений, база сейсмологических данных, расчетное значение интенсивности с учетом сейсмического микрорайонирования для периода повторяемости $T=500$ лет и пикового ускорения, модель строения среды под площадкой строительства. Использована авторская региональная методика моделирования акселерограмм.

Результаты. Получен комплект акселерограмм сильных сейсмических движений грунта для прогнозных сейсмических воздействий на площадке строительства в г. Симферополе. Представлены интервалы амплитуд и частот, опасных для здания. Комплект расчетных акселерограмм является основой для расчета сейсмических нагрузок с применением прямого динамического метода при проектировании здания.

Выводы. Используемый метод генерации синтетических акселерограмм, в отличие от других методов, наиболее адекватно отображает реальный процесс движения почвы при падении на поверхность сейсмической волны, порождаемой сильным землетрясением. "Образ" расчетных акселерограмм достаточно полно имитирует реальную картину сейсмического воздействия на площадку строительства объекта от максимальных землетрясений Крыма. Показано, что частицы грунта при падении сейсмической волны на площадку совершают также вращательные движения и могут вызвать в конструкции крутильные деформации, которые необходимо учитывать при выполнении проектных работ.

Ключевые слова. Акселерограмма, сейсмические воздействия, спектр, землетрясение, сейсмостойкое строительство.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмические волны от сильных землетрясений, воздействуют на здания и сооружения сложным образом. Механический отклик сооружения зависит от частотного состава входящей волны, реакции грунта, на котором находится сооружение, технических особенностей конструкций сооружения, находящегося на грунте. Полную информацию о напряженно-деформированном состоянии конструкций или отдельных их элементов под воздействием сейсмических колебаний может дать динамический расчет с определением реакции сооружения во временной области. В связи с этим, в практике сейсмостойкого строительства, особенно ответственных и экологически опасных объектов, для расчета сейсмических нагрузок регламентируется применять динамический метод

с использованием реальных или синтезированных акселерограмм сильных движений грунта (Нормативный документ СП 14.13330.2018, Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81* Москва, 2018).

Актуальность применения динамического метода расчета сейсмических нагрузок на здания и сооружения в Крыму очевидна в связи с возросшим в последние годы строительством объектов повышенной категории ответственности и экологической опасности: автомагистрали, газопроводы, высотные здания (высотой более 50 м), детские учреждения и т.д.

В данной статье рассмотрены подходы и результаты моделирования сейсмических воздействий от прогнозных сильных землетрясений на примере проектируемого Крымского Государственного центра детского театрального искусства в г. Симферополь.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время существует несколько методов расчета акселерограмм сильных движений [1-8]. **1. Метод реальных акселерограмм.** В этом методе используются инструментально зарегистрированные в определенных пунктах акселерограммы от сильных землетрясений. Записи акселерограмм хранятся в цифровом виде в мировых базах данных. Однако, в Крыму за период инструментальных наблюдений сильные движения грунта от местных землетрясений не зарегистрированы, а использование записей из других регионов не представляется корректным в силу отсутствия идентичности геолого-тектонических и сейсмологических условий различных регионов.

2. Метод, основанный на моделях разлома (способ теоретического моделирования и полуэмпирический метод). Для его использования необходимы точные знания о глубинном строении и добротности среды в очаговой зоне и на пути распространения сейсмических волн, физико-механические параметры самих очагов и др. Многообразие сеймотектонических условий в Крымском регионе затрудняет использование этого метода.

3. Метод стандартных спектров реакций. Метод стандартных спектров (РБ,2000), взятых из нормативных документов СП 14.13330.2018 и НП-031-01, среди перечисленных методов является наиболее универсальным и распространенным, который используется при отсутствии информации о сейсмических воздействиях в регионе. Использование огибающих спектров реакций из нормативных документов других стран, в частности Евросоюза (Еврокод 8, 2004), при моделировании акселерограмм позволяет в полной мере учесть богатый мировой опыт и современные тенденции развития сейсмостойкого строительства. Особенность метода заключается в том, что основываясь на мировом опыте наблюдений за динамическими параметрами волновых форм разрушительных землетрясений и при помощи теории спектров упругих реакций, можно дать оценку возможности реализации сейсмических воздействий в регионе с аналогичными геологическими условиями и геодинамическими процессами в очагах землетрясений.

4. Метод синтетических акселерограмм. Этот метод используется в сейсмических регионах, для которых невозможно получить записи сильных движений в силу длительного периода повторяемости таких землетрясений. Тогда при создании акселерограммы сильного движения используется принцип подобия сильных и слабых землетрясений по ряду параметров. Принцип подобия отражает известный экспериментальный факт фрактальности сейсмичности. На основе принципа подобия конструируется «образ»

акселерограммы сильного движения. При этом возможны два варианта моделирования акселерограмм:

а) методом статистического моделирования с соблюдением эмпирических закономерностей, составляющих основу подобия;

б) использование реальных «типичных» сейсмограмм, записанных на ближайших к объекту сейсмических станциях от слабых землетрясений и затем трансформированных в соответствии с принципом подобия на большие магнитуды [8]. Такая методика расчета синтетических акселерограмм была разработана в Крыму. Она прошла научную апробацию на международных конференциях, опубликована в статьях [8, 9, 10] и рекомендована для практического использования. Особое преимущество методики состоит в максимально возможном учете особенностей сеймотектонических условий Крыма, характера излучения из очага сейсмических волн и свойств глубинной среды на пути "очаг-станция регистрации". Методика постоянно совершенствуется в связи появлением новых экспериментальных сейсмологических данных и пополнения статистики по ее практическому применению.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе при расчете акселерограмм сильных движений использована методика "типичных" землетрясений [8]. Она основана на особенностях сейсмичности Крымско-Черноморского региона. Динамические и спектральные характеристики записей сейсмических волн и «истинных» смещений почвы на сейсмических станциях Крымской сети в широком энергетическом диапазоне энергий (К0, Кm) подчиняются простым эмпирическим зависимостям вида:

$$\lg A = a + bK \quad (1)$$

где А – динамические (максимальная амплитуда и период смещения, относительная и общая длительность записи и др.), спектральные характеристики (угловая частота f0, спектральная плотность в длиннопериодной части спектра Ω0), К – энергетический класс (десятичный логарифм сейсмической энергии) или моментная магнитуда Mw. Предполагается, что эти зависимости справедливы при экстраполяции их на большие магнитуды (Mm<M<Mmax) или энергетические классы (Km<K<Kmax), где Mmax и Kmax – энергетические параметры максимального возможного землетрясения в данном регионе. Таким образом, постулируется и экспериментально подтверждается закон подобия динамических характеристик записей сейсмических волн и их

спектров для слабых и сильнейших землетрясений [11]. Этот закон является главной экспериментальной основой методики расчета сильных воздействий. Такая методика обосновывалась ранее теоретически и предлагалась для построения синтетических акселерограмм [2, 3].

Важным условием в методике является **выбор ближайшей к исследуемому объекту сейсмической станции, для которой** получены зависимости (1) и отбор характерных ("типичных") записей слабых толчков из основных сейсмогенерирующих зон, могущих создать наибольшие воздействия на выбранную площадку. При этом необходимо использовать записи землетрясений компактной группы из этих зон и с глубинами очагов, попадающими в интервал преобладающих за длительный интервал времени для данной геологической структуры.

"Типичными" сейсмограммами землетрясений можно считать такие записи, которые удовлетворяют следующим условиям: параметры продольных (P) и поперечных (S) волн и отношения амплитуд AS/AP и периодов TS/TP на ближайшей к объекту станции регистрации соответствуют преобладающим долговременным значениям в функции их распределения. Для станции "Симферополь", использованной в данной работе, отношение амплитуд AS/AP находится в интервале от 2 до 6 при максимуме AS/AP = 4, а TS/TP = 2. Энергетический спектр записи имеет один максимум в ограниченной области частот; форма и параметры амплитудного спектра не противоречит стандартной теоретической модели Д. Брюна [12], в рамках которой надежно аппроксимируются спектры Крымских землетрясений за длительный интервал времени [13].

После ряда математических процедур "типичные" записи слабых землетрясений с использованием региональных зависимостей (1) трансформировались в смещения, соответствующие гипотетическому сильному землетрясению, которое могло быть зарегистрировано на станции. Трансформация смещения от слабого к сильному землетрясению возможна двумя путями. 1. В спектральном представлении – сдвиг по оси частот и спектральных амплитуд в соответствии с зависимостями (1); 2. во временной области – деформации временной и амплитудных осей.

Важным отличием используемой нами методики от других методик [1-7] является процедура трансформации смещений от гипотетического сильного землетрясения, отнесенного к станции регистрации, на исследуемый пункт. При выборе исходных данных важнейшим требованием является близость пункта регистрации "типичного" землетрясения к объекту, для которого рассчитываются акселерограммы,

При выполнении такого требования будут близкими траектории сейсмических лучей вдоль

трасс от очага на сейсмическую станцию и исследуемый пункт, комплексные частотные характеристики, описывающие затухание и дисперсию колебаний за счет неидеальной упругости среды, геометрическое расхождение лучей и диаграммы направленности излучения из очага в направлении указанных пунктов одинаковы. Большинство сейсмических станций Крыма расположено на коренных породах, поэтому можно считать, что условия распространения волн к станции и к объекту отличаются только особенностями подстилающих пород под объектом. Тогда в спектральном представлении задача трансформации состоит в расчете комплексной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) пачки слоев под объектом и умножением ее на комплексный спектр расчетных смещений от гипотетического сильного землетрясения, отнесенного к станции регистрации. Далее, производится перевод смещений а ускорения. В случае временного представления, производится свертка расчетного смещения на станции с импульсной характеристикой пачки слоев под исследуемым пунктом. После этого производится нормировка полученной акселерограммы на максимальное (пиковое) ускорение и нормировка на значение пикового ускорения, соответствующее максимальной расчетной интенсивности (с точностью до десятых балла).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходными данными для исследования служили:

1. Сейсмограммы сеймостанции «Симферополь» и унифицированная база данных по кинематическим, динамическим, спектральным и очаговым параметрам землетрясений Крыма за длительный интервал времени. Основную опасность для г. Симферополь, в котором находится исследуемая площадка строительства, представляют сильные движения грунта от землетрясений, генерируемых, в основном, структурами Южнобережного и прилегающих к нему разломов. Южнобережная сейсмогенерирующая структура на всем протяжении однородна и обладает одинаковым сейсмическим потенциалом с прогнозными катастрофическими землетрясениями с магнитудами $M=7$ [14].

Были выбраны записи двух «типичных» землетрясений (3 компоненты в цифровом виде) зарегистрированных на сейсмической станции "Симферополь". Объект находится от станции на расстоянии менее 1 км. Эти относительно слабые землетрясения произошли в двух сейсмогенерирующих структурах, представляющих опасность для г. Симферополя. Расположение эпицентров и станции показаны на схеме (рис.1).

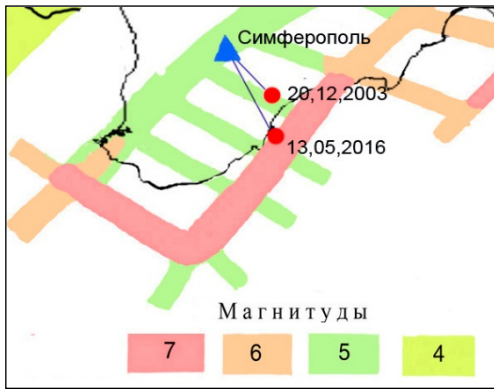


Рис. 1. Схема расположения эпицентров «типичных» землетрясений и станции «Симферополь».

Fig.1. The layout of the epicenters of "typical" earthquakes and the station "Simferopol".

Типичное землетрясение №1, произошло 20 декабря 2003 года, время в очаге 00 час 47 мин. 35.5 с, параметры очага $\varphi=44.76^{\circ}N$, $\lambda=34.39^{\circ}E$, $h=21$ км, $K=8.1$ ($M_w=2.8$) (зона Демерджинского разлома, сопряженная с Южнобережной зоной), эпицентральное расстояние от сейсмической станции «Симферополь» – 30 км. Запись землетрясения приведена на рис.2.

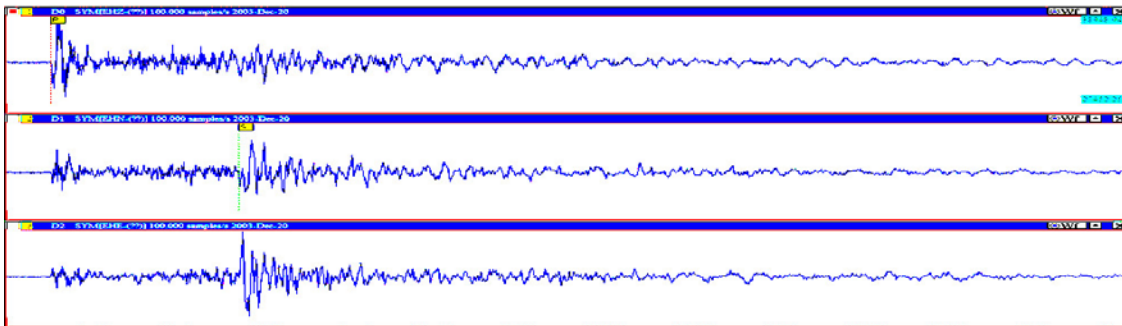


Рис. 2. Запись «типичного» землетрясения 20 декабря 2003 года, полученная на сейсмостанции «Симферополь» (компоненты Z, NS, EW).

Fig.2. An example of a record of a "typical" earthquake on December 20, 2003, received at the Simferopol seismic station (components Z, NS, EW).

Типичное землетрясение №2, произошло 13 мая 2016 года, время в очаге 14 час. 05 мин. 28 с, параметры очага $\varphi=44.61^{\circ}N$, $\lambda=34.41^{\circ}E$, $h=14$ км, $K=10.5$ ($M_w=3.5$) (Южнобережная сейсмогенная зона) эпицентральное расстояние от сейсмической станции «Симферополь» – 58 км. На рис.3. показана запись этого землетрясения.

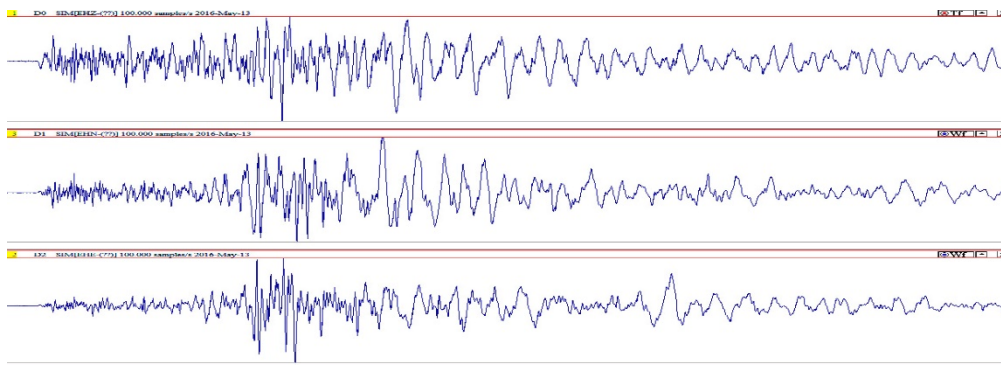


Рис.3. Запись «типичного» землетрясения 13 мая 2016 года, полученной на сейсмостанции «Симферополь» (компоненты Z, NS, EW).

Fig.3. An example of a record of a "typical" earthquake on may 13, 2016, received at the Simferopol seismic station (components Z, NS, EW).

2. Для исследуемого участка строительства использована уточненная исходная сейсмичность (УИС), которая составляет $I_R = 7.38$ балла с периодом повторяемости $T=500$ лет с вероятностью 0.1 превышения прогнозируемых значений (эти данные представлены авторам по результатам сейсмического микрорайонирования, Фонды ООО «КРЫМГИИНТИЗ», 2017). Переход от I_R к пиковому ускорению (PGA) проводился по формуле связи этих величин в соответствии национальным стандартом РФ ГОСТ Р 57546-2017:

$$I = 2.51g(PGA) + 1.89 \pm 0.6$$

3. Для расчетов и трансформации спектров и записей применялись корреляционные зависимости типа (1).

4. Использована информация о параметрах среды под исследуемом участком по результатам инженерно-геологических изысканий (фонды ООО «КРЫМГИИНТИЗ», 2017г).

5. Для расчетов применялось разработанное авторское программное обеспечение.

Таким образом, для подготовки генерации акселерограмм были соблюдены все описанные выше основные принципы методики: близость объекта к сейсмической станции "Симферополь" (порядка 1 км); расположение сейсмической станции "Симферополь" на коренных породах; выбраны записи "типичных" землетрясений, произошедших в основных сейсмогенерирующих зонах на глубинах с преобладающим диапазоном

гипоцентров; отобранные записи успешно прошли проверку на соответствие критериям «типичности» спектральных и очаговых параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Как принято в практике моделирования акселерограмм [1, 6, 7], для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений требуются акселерограммы, ориентированные по направлениям «очаг-объект» (радиальная составляющая R), перпендикулярная R – (тангенциальная составляющая T) и вертикальная Z. Компоненты NS и EW смещений почвы выбранного «типичного» землетрясения перепроектировались в горизонтальной плоскости на радиальное (R) и тангенциальное (T) направления.

Расчет частотных характеристик среды проводился по разработанной программе, использующий алгоритм Л.И. Ратниковой [15], реализующий матричный метод Томсона-Хаскелла [16, 17]. Основу этого алгоритма составляют рекуррентные соотношения между потенциалами падающих, отраженных и преломленных волн. На рис. 4 представлены расчетные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) среды под исследуемой площадкой.

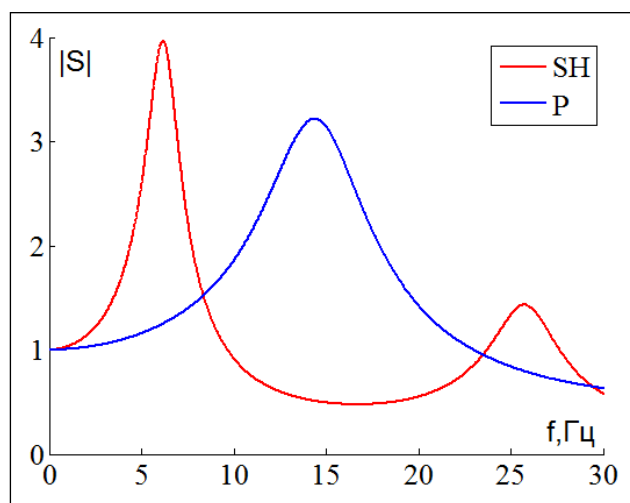


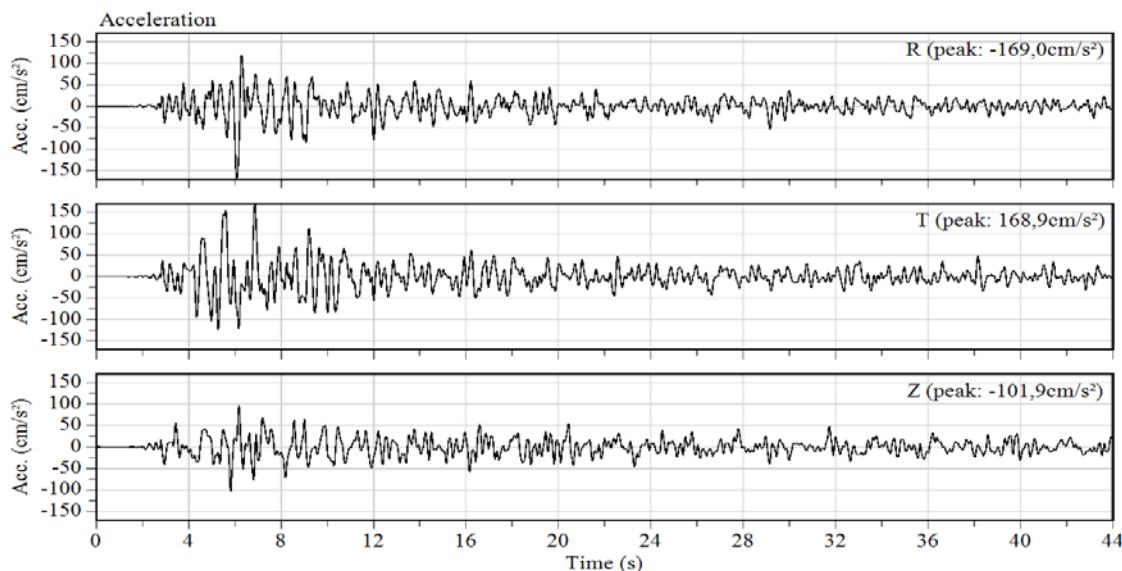
Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) среды для волн P и SH на исследуемой площадке строительства.

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics (AFC) of the medium for P and SH waves at the investigated construction site.

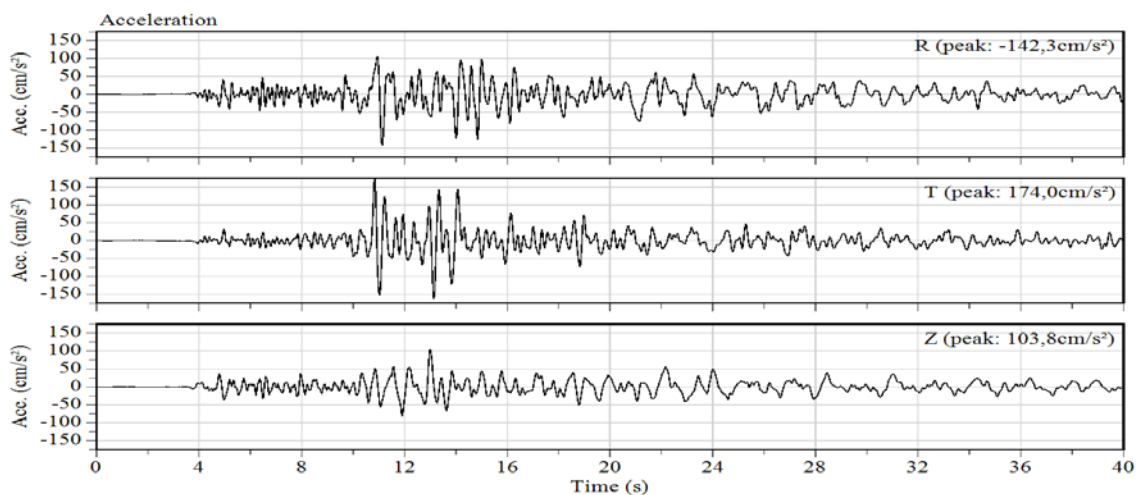
Как видно (рис.4), АЧХ среды под исследуемой площадкой строительства имеют два максимума на частотах порядка 5-6 Гц и 26 Гц, для поперечных волн SH и один максимум для продольных P-волн на частотах вблизи 15 Гц.

Используя частотные характеристики среды в соответствии с методикой [8], рассчитывались синтетические акселерограммы для вероятного максимального сотрясения $I_R = 7.38$ балла на исследуемой площадке для периода

повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет для двух очаговых зон (рис.5 а, б).



А



Б

Рис. 5. Акселерограммы прогнозируемого расчётного землетрясения с интенсивностью $I_R = 7.38$ балла от очагов зон разломов: а—Демерджинского; б- Южнобережного.

Fig. 5. Accelerograms of the predicted estimated earthquake with an intensity of $I_R = 7.38$ points from the foci of fault zones: a — Demerdzhinsky; b- South Coast.

Как видно из рис.5, акселерограммы несколько отличаются друг от друга. Так акселерограммы из района Демерджинского разлома после наступления главной фазы с течением времени мало меняют амплитудный и частотный состав, в то время как для акселерограммы Южнобережного разлома четко выделяются фазы Р и S волн, затем наступают длиннопериодные цуги. Амплитуды на горизонтальных составляющих акселерограмм примерно в 1.5 раза больше, чем на вертикальных. Общая длительность акселерограмм до полного спада колебаний составляет 44с и 40 с. Максимальные значения колебаний на акселерограммах довольно быстро затухают, до времен примерно 16 с на акселерограмме от Демерджинского разлома (рис.5.а), и 25с от Южнобережного (рис.5.б). Вероятнее всего это

связано как с особенностями среды в окрестности очага и направленностью очагового излучения, так и с разной удаленностью до станции регистрации. Если сравнить компоненты акселерограмм, можно отметить, что максимальная амплитуда ускорений 1 группы акселерограмм составляет 169 см/с² и 174 см/с² у 2-й группы. Однако в акселерограмме, смоделированной от «типичного землетрясения №1» имеется пиковое ускорение на радиальной R-компоненте, в отличие от 2-й группы акселерограмм, где максимальные значение акселерограмм получено на тангенциальной T-компоненте.

В моделированных акселерограммах содержится информация не только об ускорениях, но и о скоростях и смещениях почвы, поэтому оценивать параметры движения необходимо в комплексе по ускорениям, скоростям и смещениям.

На рис. 6 приведена диаграмма, которая позволяет оценить параметры сейсмических воздействий одновременно по трем параметрам движения среды по ускорению, скорости и смещению. Результаты измерений динамических параметров по волновым формам можно сравнить с экспериментальными данными, но не для каждого региона есть надежная статистика. В работах [1, 18] приведены некоторые результаты из мирового опыта. Диаграмма ADRS используется в рамках теории спектров упругих реакций [19], которая положена в основу Еврокода 8 (EN 1998-1. 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, BSI.). В строительных нормах СП 14.13330.2018 роль модели спектра упругих реакций выполняет кривая динамичности, которая принимает максимальное значение равное 2,5.

Модель спектра (рис.6) представлена в виде ломанной огибающей кривых, построенных по псевдоспектрам ускорений в зависимости от псевдосмещений с 5% затуханием упругих реакций. В основу графиков положены два комплекта акселерограмм (рис.5). Наибольший интерес представляют максимальные значения спектров ускорений (RSA_{max}), скоростей (RSV_{max}) и смещений (RSD_{max}) по которым можно сравнить прогнозные значения магнитуд и эпицентральных расстояний с экспериментальными значениями, полученными по мировым данным. Периоды T_1 и T_2 определяют границы столбовидной части спектра скорости, квадрат которой пропорционален кинетической энергии передаваемой от грунта к основанию здания.

Пиковые ускорения (PGA), скорости (PGV) и смещения (PGD) временных волновых форм сейсмических воздействий определяются приблизительно из модели, ограничивающей внутреннюю часть кривых на рис.6. Пиковые

значения используются для примерной оценки макросейсмического эффекта на площадке строительства по Шкале сейсмической интенсивности (ГОСТ Р 57546 2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности». Национальный стандарт РФ, 2017. 32 с.). Из рисунка 6 приближенно определены значения $PGA=170$ см/с², $PGV=30$ см/с, $PGD=5$ см. Согласно ГОСТ Р 57546 2017, полученные значения соответствуют расчетной интенсивности от 7,0 до 7,5 балла по PGA, от 7,5 до 8,0 балла – по PGV и от 7,0 до 7,5 балла – по PGD. Эти значения хорошо согласуются с расчетной интенсивностью $IR=7.38$ для площадки строительства.

Расчетное значение кривой динамичности, определенное как частное от деления RS_{Amax} и PGA составляет около 2,8, что выше значения, определенного в СП 14.13330.2018. Эмпирический уровень нормированной спектральной кривой при 5% затухании для горизонтальных компонент для всех типов грунтов, рассматриваемых совместно, в среднем равен $3.5 \pm 0.20\%$ [20]. Полученные нами значения коэффициента динамичности составляют от 2,7 до 4,0 при длительности основной фазы колебаний до 10 с, хорошо согласуется с формулой Ф.Ф. Аптикаева по большому числу экспериментальных данных [21].

Наиболее опасными для рассматриваемого объекта строительства являются периоды от 0,8 с (1,25 Гц) до 2 с (0,5 Гц), при которых с увеличением ускорений увеличиваются смещения.

Остаточные смещения в данной модели спектра упругой реакции отсутствуют, из-за удаленности от зоны генерации землетрясений, но при сейсмических воздействиях более 7-8 баллов непосредственно в эпицентральной зоне (на расстояниях до 15 км от очага) должны быть учтены путем интеграции в акселерограммы модели ступеньки смещения [22].

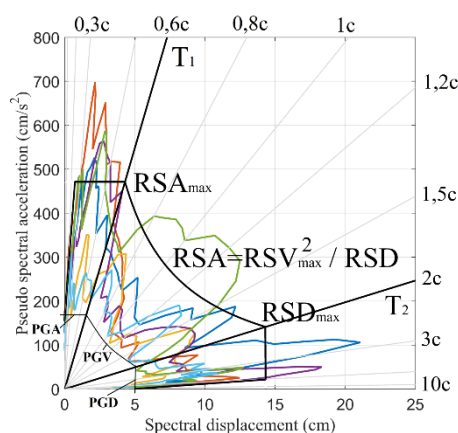


Рис.6. Диаграмма ADRS для акселерограмм, рассчитанных для площадки Кукольного театра г.Симферополь.

Fig.6. Chart of the ADRS for accelerograms calculated for the Puppet theater in Simferopol.

Для выявления общих свойств или различий в частотном диапазоне максимальных значений энергии волн, подходящих к объекту, по методике [13] были построены энергетические спектры акселерограмм (рис. 7).

Все энергетические спектры имеют резонансную форму максимума. Если обратить внимание на ширину спектра, можно легко заметить, ширина энергетических спектров акселерограмм из очаговых зон №1 и №2 несколько различны.

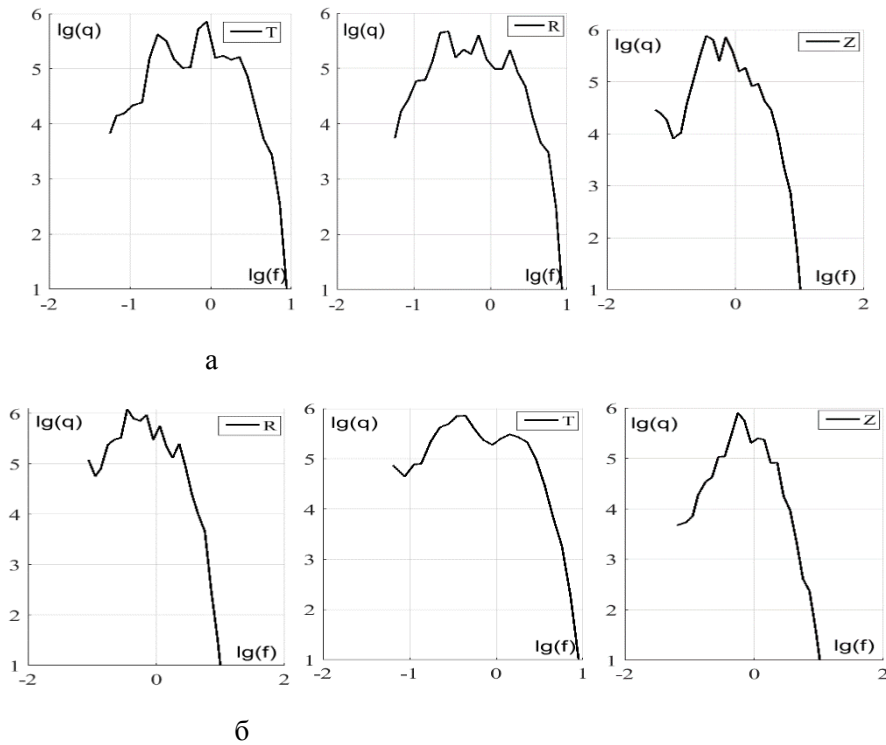


Рис.7. Энергетические спектры акселерограмм прогнозируемой интенсивности $I_R = 7.38$ балла на площадке строительства от землетрясений из сейсмогенерирующих он разломов: а-Демерджинского; б- Южнобережного.

Fig.7. The energy spectra of accelerograms of the predicted intensity $I_R = 7.38$ points at the construction site due at the construction site due a – Demerdzhinsky; b- South Coast.

Таблица 1. Характеристики энергетических спектров акселерограмм.

Table 1. Characteristics of energy spectra of accelerograms.

№ з-тр.	$F_{qmax}, Гц$			$\delta f_q (f_1 - f_2), Гц$		
	R	T	Z	R	T	Z
1	0,28	0,89	0,35	0,2-0,31	0,7-1	0,32-0,9
2	0,35	0,45	0,56	0,3-0,8	0,22-0,56	0,44-0,8

Вероятнее всего, это связано с пространственной локализацией очагов «типичных землетрясений». «Типичное землетрясение №1» расположено на материковой части Крымского полуострова, очаг 2-го землетрясения расположен в море на удалении от объекта почти в 2 раза. Так же данное отличие повлияло на частоту максимальных значений энергии (табл. 1).

Энергетические спектры акселерограмм №1 имеют максимумы на частотах 0.25-0.35 Гц. Отклоняющаяся от нормы частота максимума Т-компоненты связана с двугорбой формой спектра. Максимальные значения энергетического уровня, у акселерограмм №2, расположены в более высокочастотном диапазоне 0.35-0.56 Гц. Так же можно отметить, что спектры данной группы имеют более пикообразную форму максимума.

Распределение преобладающих частот в амплитудном спектре в зависимости от времени принято находить с помощью спектрально-временного анализа реакций (СВАР). Результатом СВАР является спектральная плотность как функция двух координат – частоты (или периода) и времени. Графически такую поверхность удобно представлять в виде изолиний поверхности равных аппликат. Практически такие же функции выполняют так называемые спектрограммы, которые представлены в математической компьютерной системе MATLAB специальным оператором [23]. На рис. 10 показан пример спектрограмм рассчитанных ускорений для "типичного" землетрясения 13 мая 2016 г. В качестве фильтра здесь использовано окно Кайзера

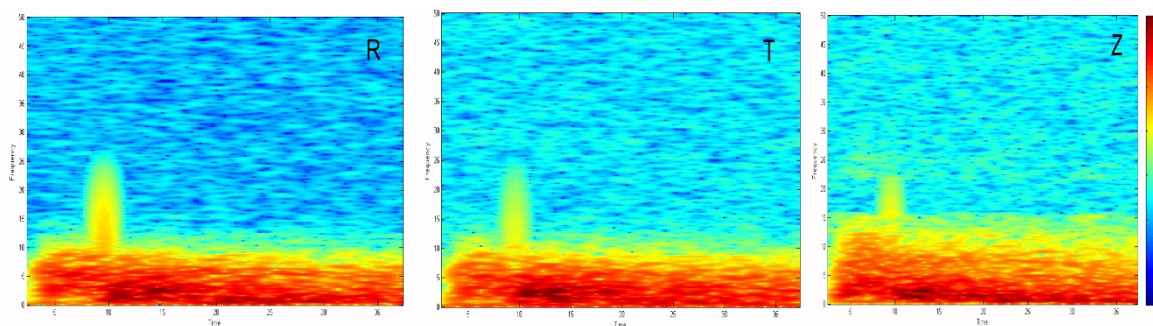


Рис. 8. Пример спектрограмм расчетных ускорений на площадке строительства от землетрясений из зоны Демерджинского разлома. Справа в столбце показаны нормированные величины плотностей спектральных амплитуд. Максимальные значения окрашены в темно-красный цвет.

Fig.8. An example of spectrograms of calculated accelerations at the construction site due to earthquakes from the Demerdzhinsky fault zone. The right column shows the normalized values of the densities of the spectral amplitudes. The maximum values are colored dark red.

Спектрограммы показывают, что частоты спектральных максимумов на всех 3-х компонентах распределены по оси времени сплошной полосой, плавно спадая от 10 до 18 с (красная полоса на спектрограммах). Ядра максимальных плотностей присутствуют на временах приблизительно от 10 до 15 секунд на частотах менее 0.5-2.5 Гц. Выделяется "горб" в районе 10 с, соответствующий по времени максимуму в смещениях в поперечной волне, который выделяется на общем частотном фоне в интервале от 0 до 25 Гц. На вертикальной компоненте Z максимум спектральной плотности прослеживается от 10 с до 34 с. Это свидетельствует о том, что в вертикальном направлении для данной акселерограммы энергетически значимые амплитуды присутствуют на большем отрезке времени, чем на горизонтальных компонентах. Таким образом, проведенный анализ свидетельствует о том, что наиболее опасными для объекта нужно считать частоты в интервале 0.5-2.5 Гц, что видно при

анализе энергетических спектров, спектрограмм и диаграмма ADRS.

Грунт во время землетрясения подвергается как горизонтальным, так и крутильным деформациям. В общем случае движение грунта во время землетрясения состоит из 6 компонентов, из которых три компонента вместе будут составлять главный вектор движения, а другие три компонента - главный момент движения. Главный вектор движения составляют расчетные акселерограммы, главный момент движения вычисляется из вектора движения. Крутильные деформации возникают не только в протяженных зданиях и сооружениях с несимметричными распределениями масс и жесткостей, но и в зданиях с небольшими размерами в плане и полным симметричным распределением масс и жесткостей. Из рисунка 9 видно, что горизонтальные компоненты главного вектора движения создают крутильные колебания среды.

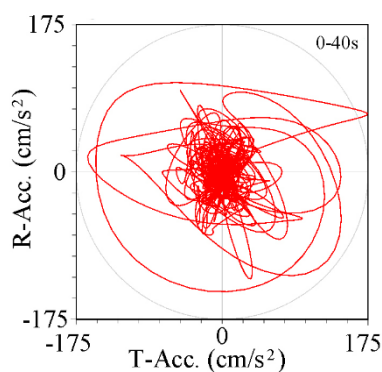


Рис. 9. Движение конца вектора ускорения в проекции на горизонтальную плоскость.

Fig.9. The movement of the end of the acceleration vector in the projection on the horizontal plane.

Этот рисунок показывает, что частицы поверхности при падении сейсмической волны на исследуемую площадку совершают вращательные движения с определенным ускорением, которое может вызвать в конструкции крутильные колебания. Учет таких колебаний при больших крутильных воздействиях необходимо учитывать при проектировании [24].

ВЫВОДЫ

В статье представлены результаты расчетов синтетических акселерограмм для реальной площадки строительства – Крымского государственного центра театрального искусства в г Симферополе АР Крым.

Моделирование основано на методике использования реальных «типичных» сейсмограмм слабых землетрясений из сейсмогенерирующих зон. Сейсмические воздействия от землетрясений, зарегистрированные на ближайшей к объекту сейсмической станции "Симферополь", трансформированы на прогнозные ожидаемые воздействия в соответствии с принципом подобия.

Проведен анализ динамических характеристик расчетных акселерограмм, их энергетических спектров и спектрограмм, соответствия этих данных стандартной кривой динамичности. Ускорения почвы от вероятных сильных землетрясений по времени могут длиться около 40-44 с. Максимальные ускорения довольно быстро затухают, до времен примерно 16 с на акселерограмме от очагов зоны Демержинского разлома и 25 с – от Южнобережного разлома. Максимумы ускорений составляют 169-174 см/с², что соответствуют нормативным величинам для расчетной интенсивности I_R на площадке объекта строительства.

Преобладающие частоты в акселерограммах, которые могут быть опасны для сооружения, находятся в интервале от 0.5 Гц до 2.5 Гц. Максимальный энергетический вклад представляют частоты 0.25-0.35 Гц. Вдоль записи максимальные спектральные плотности присутствуют на временах от 10 с до 18 с (горизонтальные компоненты), от 10 с до 34 с (вертикальная компонента). Расчет кривой динамичности показал их соответствие мировым данным.

Анализ ускорений на горизонтальной поверхности показал, что при падении сейсмической волны на исследуемую площадку могут возникать опасные для объекта крутильные деформации, которые необходимо учитывать при проектировании объекта.

Следует также отметить, что корректность расчета акселерограмм для конкретного объекта строительства или реконструкции связана с качеством проведения инженерно-геологических изысканий (желательно до глубин не менее 30 м или до подошвы коренных пород), детальных исследований по уточнению исходной (нормативной) и определению расчетной сейсмичности с учетом результатов сейсмического микрорайонирования. Как было показано в работе [10] наблюдается значительное различие в спектрах сейсмических колебаний не только при изменении категории грунтов, но и внутри одной категории с разными физико-механическими свойствами грунта внутри каждого слоя и мощности слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий. Задание сейсмических воздействий // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. М.: Наука. 1993. С. 5–94.
2. Раутиан Т.Г. Роль очага и отклика среды в схеме формирования сейсмических колебаний. Инженерно-сейсмические проблемы // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.18. М.: Наука. 1976. С. 3–13.
3. Раутиан Т.Г., Голубятников В.Л., Никифорова М.Н. Изучение характеристики

сейсмических колебаний и методика построения синтетических сейсмограмм сильных землетрясений. Инженерно-сейсмические проблемы // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.18. М.: Наука, 1976. С.15–22.

4. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Генерирование искусственных акселерограмм методом масштабирования реальных записей // Физика Земли. 2002. №7. С. 39–45.

5. Крамынин П.И., Штейнберг В.В. Параметры колебаний плотных грунтов при сильных землетрясениях. Инженерно-сейсмические проблемы // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.18. М.: 1976. 62 с.

6. Кендзера А.В. Способ получения расчетных акселерограмм путем пересчета из сейсмических записей // Геофиз. журнал. 1987. Т.9. №5. С. 75–79.

7. Исичко Е.С. Методика расчета акселерограмм для конкретной строительной площадки // Buletinul Institutului si Seismologie al ASM. №1. 2007. pp. 58–67.

8. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Калинюк И.В., Мержей Е.А. Пустовитенко А.А. Методология и методические основы моделирования сейсмических воздействий на высотные здания в Крыму // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) Вип.73. Київ. ДП НДІБК. 2010. С. 316–323.

9. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Калинюк И.В., Мержей Е.А. Сравнительные характеристики акселерограмм, смоделированных для разных сеймотектонических условий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №6. 2012. С. 20–23.

10. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мержей Е.А. Моделирование прогнозных воздействий сильных землетрясений Крыма // Строительство и техногенная безопасность. Вып. 35. Симферополь: НАПКС. 2011. С. 104–111.

11. Пустовитенко Б.Г. О подобии очагов слабых и сильных землетрясений Крыма // Сучасні небезпечні процеси. Вплив на довкілля. Нові технології прогнозування та захисту (Матеріали 2-й науково-техніч. конференції). НПЦ «Екологія. Наука, Техніка». Київ. 2004. С. 59–61.

12. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. 75. No 20. pp. 4997–5009.

13. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев. Наукова думка. 1990. 252 с.

14. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Борисенко Л.С., Поречнова Е.И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // Геофиз. журнал. №6. Т. 21. 1999. С. 3–15.

15. Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М.: Наука. 1973. 124 с.

16. Thomson W.T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium // *J. Appl. Phys.*, 1950. Vol. 21. No 2. pp.89–93.
17. Haskell N.A. The dispersion of surface waves in multilayered media // *Bull. Seismol. Soc. America*. 1953. Vol. 43. No 1. pp. 17–34.
18. Lam, N., Wilson, J. Displacement modelling of intraplate earthquakes. ISET // *Journal of Earthquake Technology*. 2004. Vol. 41(1). pp. 15–52.
19. Newmark N.M., Hall W.J. Earthquake spectra and design. EERI Monograph, Earthquake Engineering Research Institute. 1982. 103 p.
20. Аптикаев Ф.Ф., Михайлова Н.Н., Жунусов Т.Ж. и др. Проект стандарта для интенсивности землетрясения // *Сейсмостойкое строительство. М: ЭИ ВНИИТПИ*. 1996. Вып. 5. С. 12– 20.
21. Перетокин С.А. Некоторые аспекты вероятностной оценки сейсмической опасности с использованием эмпирических зависимостей // *Инженерные изыскания*. 2016. №7. С. 39–47.
22. Калинин И.В., Ярошенко А.А., Панков Ф.Н., Бойко В.А. Определение максимальных остаточных смещений по записям велосиметров. Часть 2. Методы и результаты оценки остаточных смещений // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2018. Т. 45. № 4. С. 95–105.
23. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб. Питер. 2002. 608 с.
24. Хачиян Э. Прикладная сейсмология. Изд. ГИТУТЮН. НАН Республики Армения. 2008. 491 с.
7. Ishiko E.S. Method of calculating accelerograms for the construction site // *Buletinul Institutului si Seismologie al ASM*. №1. 2007. p. 58–67. (In Russian)
8. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Kalinyuk I.V., Merzhey E.A. Pustovitenko A.A. Methodology and methodological principles for modeling seismic effects on high-rise buildings in the Crimea // *Budivel'ni konstrukcii: Mizhvidomchij naukovotekhnichnij zbirnik naukovih prac' (budivnictvo)*. Kiev: DP NDIBK 2010. pp 316-323. (In Russian)
9. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Kalinyuk I.V., Merzhey E.A. Comparative characteristics of accelerograms modeled for different seimotectonic conditions // *Bezopasnost' sooruzhenij*. 2012. N 6. pp 20-23. (In Russian)
10. Pustovitenko B.G., Kalinyuk I.V., Merzhey E.A. Simulation of predicted effects of strong earthquakes in Crimea // *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. Simferopol: NAPKS. 2011. N 35. pp 104-111.
11. Pustovitenko B.G. On the similarity of foci of weak and strong earthquakes of the Crimea // *Suchasni nebezpechni procesi. Vpliv na dovkilliya. Novi tekhnologii prognozuvannya ta zahistu (Materiali 2-j naukovo-teknich. konferencii.)*. Kiev: NPC «Ekologiya. Nauka, Tekhnika». 2004. pp. 59-61. (In Russian)
12. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1970. 75. No 20. pp. 4997–5009.
13. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma. [Spectral and focal parameters of earthquakes of the Crimea]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 251 p. (In Russian)
14. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Borisenko L.S., Porechnova E.I. General seismic zoning of the territory of Crimea (OSR-98). // *Geofizicheskij zhurnal*. N 6(21). 1999. pp. 3–15.
15. Ratnikova L.I. Methods for calculating seismic waves in thin-layered media. Moscow: Nauka. 1973. 124 p. (In Russian)
16. Thomson W.T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium // *J. Appl. Phys.*, 1950. Vol. 21. No 2. pp.89–93.
17. Haskell N.A. The dispersion of surface waves in multilayered media // *Bull. Seismol. Soc. America*. 1953. Vol. 43. No 1. pp. 17–34.
18. Lam, N., Wilson, J. Displacement modelling of intraplate earthquakes. ISET // *Journal of Earthquake Technology*. 2004. Vol. 41(1). pp. 15–52.
19. Newmark N.M., Hall W.J. Earthquake spectra and design. EERI Monograph, Earthquake Engineering Research Institute. 1982. 103 p.
20. Аптикаев Ф.Ф., Михайлова Н.Н., Жунусов Т.Ж. et al. Draft standard for earthquake intensity // *Seismostoykoye stroitel'stvo*. M: EI VNIINTPI. 1996. N 5. pp. 12– 20.
21. Peretokin S.A. Some aspects of the probabilistic seismic hazard assessment using

REFERENCES

empirical dependencies // Inzhenernyye izyskaniya. 2016. N 7. pp. 39–47.

22. Kalinyuk I.V., Yaroshenko A.A., Pankov F.N., Boyko V.A. Determination of the maximum residual displacement from the records of velocimeters. Part 2. Methods and results of residual bias estimation // Voprosy inzhenernoy seysmologii. 2018. N 4(45). pp. 95–105.

23. Dyakonov V., Abramenkova I. MATLAB. Signal and image processing. Special handbook. SPb. Piter. 2002. 608 p.

24. Khachiyani E. Applied seismology. Izd. GITUTYUN. NAN Respubliki Armeniya. 2008. 491 p.

FEATURES OF THE GENERATION OF THE ACSELEROGRAMS OF STRONG SEISMIC MOVEMENTS OF THE SOIL FOR ENGINEERING CALCULATIONS OF DESIGNED CONSTRUCTION OBJECTS IN THE CRIMEA

Pustovitenko B.G. , Kalinyuk I.V., Kulchitsky V.E., Eredzhepov E.E.

Summary The scheme of the step-by-step solution of the problem of generating accelerograms of strong ground movements in the Crimea is presented on the example of the projected construction site of the Crimea State Center for Children's Theatrical Art in Simferopol. An accelerogram modeling method based on the similarity of the statistical properties of weak and strong local earthquakes has been applied. The dependences of dynamic and spectral characteristics of seismic waves, as well as foci of earthquakes of the Crimea on the energy level are used. Based on the fractal properties of seismic processes, the law of similarity of their characteristics is postulated. Extrapolation of dependencies to large magnitudes allows you to create a "image" of the synthesized accelerogram of a strong earthquake. The basis for the calculations were seismograms of the Simferopol seismic station of earthquakes with magnitudes $M_w = 2.8-3.5$, which occurred in the nearest Crimea's seismic-generating structures at distances of 30 and 58 km from the construction object. Spectral, spectral-temporal and energy analysis of accelerograms was carried out. The intervals of the spectral characteristics that represent the greatest danger to the structure were obtained.

Subject of study. Seismic effects of strong earthquakes on buildings and structures.

Materials and methods. Records of real "typical" seismograms of local earthquakes, a seismological database, a calculated intensity value taking into account seismic microzoning for a repeatability period of $T = 500$ years and peak acceleration, a model of the structure of the medium under the construction site. The author uses the regional accelerogram modeling method.

Results. A set of accelerograms of strong seismic soil motions for predicted seismic impacts at the construction site in the city of Simferopol was obtained. The intervals of amplitudes and frequencies that are dangerous to the building are presented. The set of calculated accelerograms is the basis for the calculation of seismic loads using the direct dynamic method when designing a building.

Findings. The used method of generating synthetic accelerograms, unlike other methods, most adequately reflects the actual process of soil movement when a seismic wave is generated on the surface generated by a strong earthquake. The "image" of the calculated accelerograms rather fully imitates the real picture of the seismic impact on the construction site of the object from the maximum earthquakes of the Crimea. It is shown that soil particles also make rotational motions when a seismic wave falls on a platform and can cause torsional deformations in the structure, which must be taken into account when performing design work.

Key words. Accelerogram, seismic effects, spectrum, earthquake, earthquake resistant construction.