

Вариации интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний на территории Киева

А.В. Кендзера, Ю.В. Семенова, 2021

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 28 февраля 2020 г.

Актуальность исследований и результатов, представленных в статье, обусловлена необходимостью обеспечить проектировщиков сейсмостойкого строительства картами сейсмического зонирования населенных пунктов и агломераций на территории Украины в амплитудных параметрах сейсмических движений грунта. Предложен аналитически-эмпирический подход к картированию на примере территории Киева, который можно реализовать в условиях недостаточного количества данных результатов инструментальных сейсмологических наблюдений. Данный подход дает положительные результаты при условии хорошо изученной в геологическом отношении территории. В пределах территории Киева методом сейсмогеологических аналогий выделены участки (таксонометрические зоны), однородные по реакции на сейсмические воздействия. Для всех таксонометрических зон построены сейсмогеологические модели грунтовой толщи и рассчитаны их спектральные характеристики с учетом нелинейного деформирования грунта. Рассчитана также усредненная частотная характеристика для грунтовых условий территории Киева как функция распределения средних значений коэффициента спектрального усиления сейсмических колебаний всех зон по частоте. Построена карта распределения отклонения интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний от среднего значения для территории Киева. Предлагается использовать карту спектрального усиления для определения значений расчетного относительного ускорения грунта исследуемой площадки при использовании спектрального метода расчета на аварийное сочетание нагрузок с учетом сейсмического воздействия. Карта распределения отклонения интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний от среднего значения для территории Киева является промежуточным этапом при построении карт сейсмического зонирования Киева в амплитудных терминах колебаний грунта.

Ключевые слова: сейсмическое районирование, сейсмическая опасность, пиковое ускорение грунта, сейсмический эффект.

Введение. Сейсмическое районирование территории (отображение на картах участков территории, однородных в сейсмическом отношении и с одинаковыми значениями выбранных параметров сейсмической опасности) является сложной и важной задачей современной сейсмологии, поскольку имеет социальное, экономическое и экологическое значение. Научная сложность заключается в том, что прогнозирование сейсмической опасности относится к категории прогнозов, базирующихся на неполной информации,

скудных экспериментальных данных и на недостаточно ясных методологических позициях [Уломов, Шумилина, 1999].

Меры по обеспечению сейсмической защиты на территории Украины регламентируются «Государственными строительными нормами Украины» [ДБН В.1.1-12: 2014]. Неотъемлемая часть норм — карты общего сейсмического районирования (ОСР), на которых отображены результаты зонирования сейсмической опасности в терминах сейсмической интенсивности (балльности), которая с вероятностью

90 % (карта А), 95 % (карта В), и 99 % (карта С) не будет превышена в ближайшие 50 лет. Отображаемые на картах ОСР данные получены путем статистического анализа макросейсмических, инструментальных сейсмологических, геолого-геофизических, тектонических и геодинамических материалов, переведенных в параметры сейсмологической опасности.

Для оценки сейсмической опасности территории, в зависимости от класса ответственности исследуемого объекта, используется карта А, В или С приложения Б ГСН В.1.1-12: 2014 [ДБН В.1.1-12: 2014] и метод расчета.

При практическом определении параметров сейсмической опасности территории расположения конкретного объекта, кроме результатов ОСР, используют уточнения параметров сейсмической опасности, полученные на основе карт детального сейсмического районирования (ДСР) и сейсмического микрорайонирования (СМР).

В результате работ по ДСР уточняются эффекты, которые могут возникнуть на строительной (эксплуатационной) площадке от землетрясений, связанные с близкими потенциально сейсмоактивными зонами, влияние которых не удалось учесть при разработке карт ОСР.

В период 1960—2000 гг. большинство стран перешло к сейсмическому районированию (зонированию) в терминах амплитудных параметров колебаний [Гусев, 2011]: в пиковых ускорениях грунта (Европа, Япония, Китай) или в уровнях спектра реакции (США, Канада), поскольку использование проектировщиками именно этих параметров для обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений является корректным по сравнению с использованием несистемных единиц — баллов сейсмической интенсивности.

При наличии достаточно точных и обоснованных количественных параметров сейсмической опасности строительной площадки, специалисты по сейсмостойкому проектированию и строительству всегда могут создать надежные модели сейсмостойких зданий и сооружений, за-

щищенных от прогнозируемых землетрясений. Происходит это путем определения дополнительных сейсмических нагрузок при расчетных землетрясениях на ответственные конструкции зданий и сооружений, которые не должны превышать расчетные значения. При этом всегда есть возможность минимизировать расходы на мероприятия по сейсмической защите.

Расчеты ответственных конструкций на аварийное сочетание различных (в том числе сейсмологических) нагрузок выполняются на моделях зданий и сооружений с использованием спектрального метода, прямого динамического метода или метода нелинейного статического расчета [ДБН В.1.1-12:2014]. Самым достоверным из этих методов является прямой динамический метод расчета сейсмических напряжений в моделях, поскольку он учитывает особенности формы, распределение физических параметров модели, физическую нелинейность материалов и позволяет сравнить рассчитанные прогнозные сейсмические напряжения с допустимыми проектными напряжениями в грунтовой основе и ответственных конструкциях зданий и сооружений.

Для применения прямого динамического метода проводятся работы по сейсмическому микрорайонированию и генерируются расчетные акселерограммы для грунтовых условий конкретной строительной площадки. Расчетные акселерограммы учитывают особенности спектральных характеристик грунтовой толщи исследуемой строительной площадки.

Прямой динамический метод расчета на сейсмические воздействия согласно ГСН В.1.1-12: 2014 применяется в отдельных случаях (см. Табл. 6.2 ГСН В.1.1-12: 2014), а расчеты по спектральному методу выполняются для всех проектируемых зданий и сооружений в сейсмических районах Украины. Таким образом, спектральный метод расчета на сейсмические воздействия применяется чаще, по сравнению с прямым динамическим методом расчета, для территорий, относящихся согласно картам ОСР к 6-балльной зоне. В слу-

чае расхождения результатов расчета по спектральному и прямому динамическому методам принимаются максимальные значения нагрузок. Спектральный метод широко используется в мире при расчетах на сейсмические воздействия зданий и сооружений в пределах упругих моделей.

При использовании спектрального метода расчета на сейсмические нагрузки, согласно ГСН В.1.1-12: 2014 [ДБН В.1.1-12: 2014], для определения расчетного значения относительного ускорения грунта для исследуемой площадки (населенного пункта) в зависимости от сочетаний расчетной сейсмической интенсивности, отображаемой на картах А и В, используется Таблица 6.5. Такой подход является некорректным, поскольку не существует прямой зависимости между интенсивностью и пиковым ускорением грунта.

Единица измерения сейсмической интенсивности — балл — достаточно эффективна при экономических расчетах, но, к сожалению, малоинформативна с инженерно-строительной точки зрения [Оценка..., 1988]. Из приложения Д документа «Шкала сейсмической интенсивности» [Національний ..., 2010] (табл. 1) следует, что при 6 баллах могут наблюдаться

максимальные ускорения грунта от 3,5 до 500 см/с². И так, пересчитывая баллы в пиковые ускорения по Таблице 6.5 ГСН В.1.1-12: 2014, спектральный метод расчета на сейсмические воздействия не обеспечивает достоверного результата.

При землетрясении в Японии 11.03.2011 г. различными сейсмическими станциями было зарегистрировано максимальные ускорения грунта от 0,3g до почти 3g на примерно одинаковом эпицентральной расстоянии (около 200 км) [De Luca et al., 2011]. Такое расхождение обусловлено многообразием грунтовых условий и особенностями распространения сейсмических волн, т. е. резонансными и фильтрующими сейсмическими свойствами грунтов [Kendzera et al., 2021]. Пример распределения сейсмического эффекта землетрясения в Японии 11.03.2011 г., а также других землетрясений указывает, что информацию о сейсмической опасности территорий следует предоставлять проектировщикам сейсмостойких сооружений в физических единицах колебаний грунта, а не в баллах макросейсмической интенсивности. Этого требуют современные методы инженерных расчетов зданий на аварийное сообщение с учетом сейс-

Т а б л и ц а 1. Пиковые параметры движения грунта, зарегистрированные телеметрической сейсмологической сетью широкополосных станций K-net

Station Code	Dir	Level	Epocentral Distance	R_{jb} Distance	PGA	PGAr	PGV
			km	km	g	cm/s ²	cm/s
MYG004	NS	Surface	169	63	1,908	2699,9	109,75
IBR003	NS	Surface	254	33	1,687	1597,6	65,03
MYG012	NS	Surface	169	51	0,681	758,4	33,38
MYG013	NS	Surface	175	57	1,463	1517,2	85,76
MYG004	EW	Surface	169	63	1,218	1268,5	47,97
IBR003	EW	Surface	254	33	1,226	1185,9	42,91
MYG012	EW	Surface	169	51	1,906	1969,2	51,44
MYG013	EW	Surface	175	57	0,943	982,3	46,64
MYG004	UD	Surface	169	63	1,948	1879,9	38,90
IBR003	UD	Surface	254	33	1,113	1165,7	26,61
MYG012	UD	Surface	169	51	0,491	500,8	21,01
MYG013	UD	Surface	175	57	0,299	290,2	20,41

мического воздействия, которое изучают сейсмологи и предоставляют информацию о нем проектировщикам.

Прогнозные значения колебаний почвы всегда были и будут лучше сейсмологически обоснованными, чем используемые реакции системы «грунтовая основа—здание», поскольку геофизическими методами точнее исследуются сейсмические движения свободной поверхности грунтовой толщи. Проектировщики сейсмостойких сооружений при исследовании поведения систем «грунтовая основа—здание» рассчитывают сейсмостойкость проектируемого объекта и меняют модели, определяя наиболее экономически обоснованный сейсмостойкий проект. Сейсмологи предоставляют исходные данные для моделирования сейсмической реакции зданий и сооружений при проектных землетрясениях.

С 1 мая 2019 г. вступили в силу новые изменения в ГСН В.1.1-12: 2014. Согласно этим изменениям, при строительстве зданий и сооружений класса ответственности СС2 и СС3 высотой от 73,5 м можно использовать карту В вместо карты С из приложения Б [ДБН В.1.1-12: 2014]. Таким образом, Киев, согласно новым изменениям, для высотного строительства относится к 5-балльной зоне и соответственно более применимым будет спектральный метод расчета при проектировании сейсмостойкого строительства даже на грунтах, которые ранее не рассматривались в качестве надежной основы. Спектральный метод расчета на аварийное сочетание нагрузок с учетом сейсмического воздействия не предусматривает использование балльности. Для инженерных расчетов в этом случае необходим корректный переход от балльности к амплитудным параметрам колебаний грунтовой основы. Поскольку высотное строительство наиболее стремительно развивается в Киеве, поэтому здесь в первую очередь необходимы карты общего сейсмического районирования в параметрах колебаний грунта. К тому же территории с наиболее благоприятными в сейсмическом отношении грунтовыми

условиями уже застроены. В последнее время высотное строительство проектируют все чаще на намывных песках, заболоченных территориях и т. д., т. е. здания на таких грунтах могут получить большие повреждения.

Актуальность исследований и результатов, представленных в статье, обусловлена необходимостью обеспечить проектировщиков сейсмостойкого строительства картами сейсмического зонирования населенных пунктов и агломераций на территории Украины в физических единицах колебаний грунта: пиковых ускорениях PGA (Peak Ground Acceleration), пиковых скоростях PGV (Peak Ground Velocity) или пиковых смещениях PGD (Peak Ground Displacement). Разработка карт сейсмического зонирования вызвана потребностями современных методов сейсмостойкого проектирования и строительства [Кендзера, 2015; Semenova, Kendzera, 2019].

Методология. Самый простой способ построения карты сейсмического зонирования в физических единицах колебаний грунта базируется на использовании результатов инструментальных наблюдений. Но в условиях слабой сейсмичности достаточного количества инструментальных данных нет. Некоторые ученые применяют корреляционные связи или приложение Д документа «Шкала сейсмической интенсивности» [Национальный ..., 2010] для перерасчета балльности в физические единицы колебаний почвы. Результаты такого опыта изложены в работах [Аптикаев, 2012; Уломов, Шумилина, 1999 и др.]. Прямые перерасчеты нормативных значений макросейсмической балльности в амплитудные параметры колебаний грунта не учитывают спектральный состав сейсмического воздействия и фильтрующие свойства грунтовой толщи и поэтому являются некорректными как для использования спектрального метода расчета на аварийное сочетание нагрузок с учетом сейсмического воздействия, так и для надежного общего сейсмического районирования с заданной вероятностью превышения полученных величин.

Для условий Украины в работе предлагается аналитически-эмпирический подход, поскольку это единственный способ, который можно реализовать в условиях недостаточного количества результатов инструментальных сейсмологических наблюдений. Данный подход дает хорошие результаты при условии хорошо изученной в геологическом отношении территории.

Проиллюстрируем методологию картирования территорий крупных агломераций в физических единицах колебаний почвы на примере Киева.

На первом этапе построения карты сейсмического зонирования Киева в пределах территории города методом сейсмогеологических аналогий были выделены относительно однородные инженерно-геологические участки (таксонометрические зоны), на которых сейсмический эффект может существенно различаться. Для выделения таксонометрических зон (физического районирования) были использованы геологические карты четвертичных отложений, дочетвертичных отложений, кристаллического фундамента и схема структурно-геоморфологического районирования. Данные получены из каталога фонда ГНПП «Геоинформ Украины» (<http://geoinf.kiev.ua/wp/kartograma.htm>). Всего в пределах Киева выделено 16 таксонометрических зон (рис. 1).

Для всех таксонометрических зон были построены сейсмогеологические модели грунтовой толщи. Сейсмогеологическая модель является представлением геологической среды в виде пространственного распределения физических свойств, которые определяют распространение упругих колебаний. Как правило, моделируют изотропные среды, сейсмические свойства которых определяются следующими параметрами: скоростями продольных и поперечных волн, коэффициентами их поглощения и плотностью. Сейсмогеологическая модель состоит из геологических слоев (пластов) с различными фильтрующими (резонансными) свойствами относительно сейсмических волн. Составляющие слои

могут соответствовать разным по масштабам структурно-литологическим подразделениям геологического разреза — от мощных комплексов горных пород к пакетам тонких фациальных осадочных пропластков. Их отличительными особенностями являются ограничения в пространстве довольно простыми по форме границами (подошвой и кровлей слоя) и различием упругих свойств вмещающей толщи. В условиях субгоризонтального залегания основных инженерно-геологических элементов грунтового массива для оценки влияния толщи осадочных пород рекомендуется использовать одномерные (горизонтально-слоистые модели среды).

Значения параметров физико-механических свойств каждого слоя горизонтально-слоистых сейсмогеологических моделей всех 16 таксонометрических зон, выделенных в пределах Киева, были приняты средними из справочников [Справочник ..., 1969; Lama, Vutukuri, 1978; Goodman, 1980; Физические ..., 1984; Добрынин и др., 2004; Ладынин, 2010 и др.]. Для каждого горизонтального слоя сейсмогеологической модели были определены дополнительные динамические свойства для учета особенностей нелинейного неупругого поведения грунтов — зависимости модуля сдвига и коэффициента поглощения от величины сдвиговой деформации. Данные получены на основе результатов лабораторных и полевых исследований динамических испытаний грунтов, изложенных в работах [Seed, Idriss, 1970; Ishibashi, Zhang, 1993; Roblee, Chiou, 2004; Lanzoetal., 2009 и др.].

Принято считать, что землетрясения из разных сейсмоактивных зон характеризуются уникальными спектральными особенностями, отличающимися от других сейсмических событий. Чтобы повысить достоверность моделирования расчетных сейсмических воздействий, необходимо выполнять расчеты, используя ансамбли акселерограмм, сгенерированные для моделирования землетрясений из близких сейсмоактивных зон и подкорковых землетрясений из зоны Вранча. Такие землетрясения имеют разный спектральный

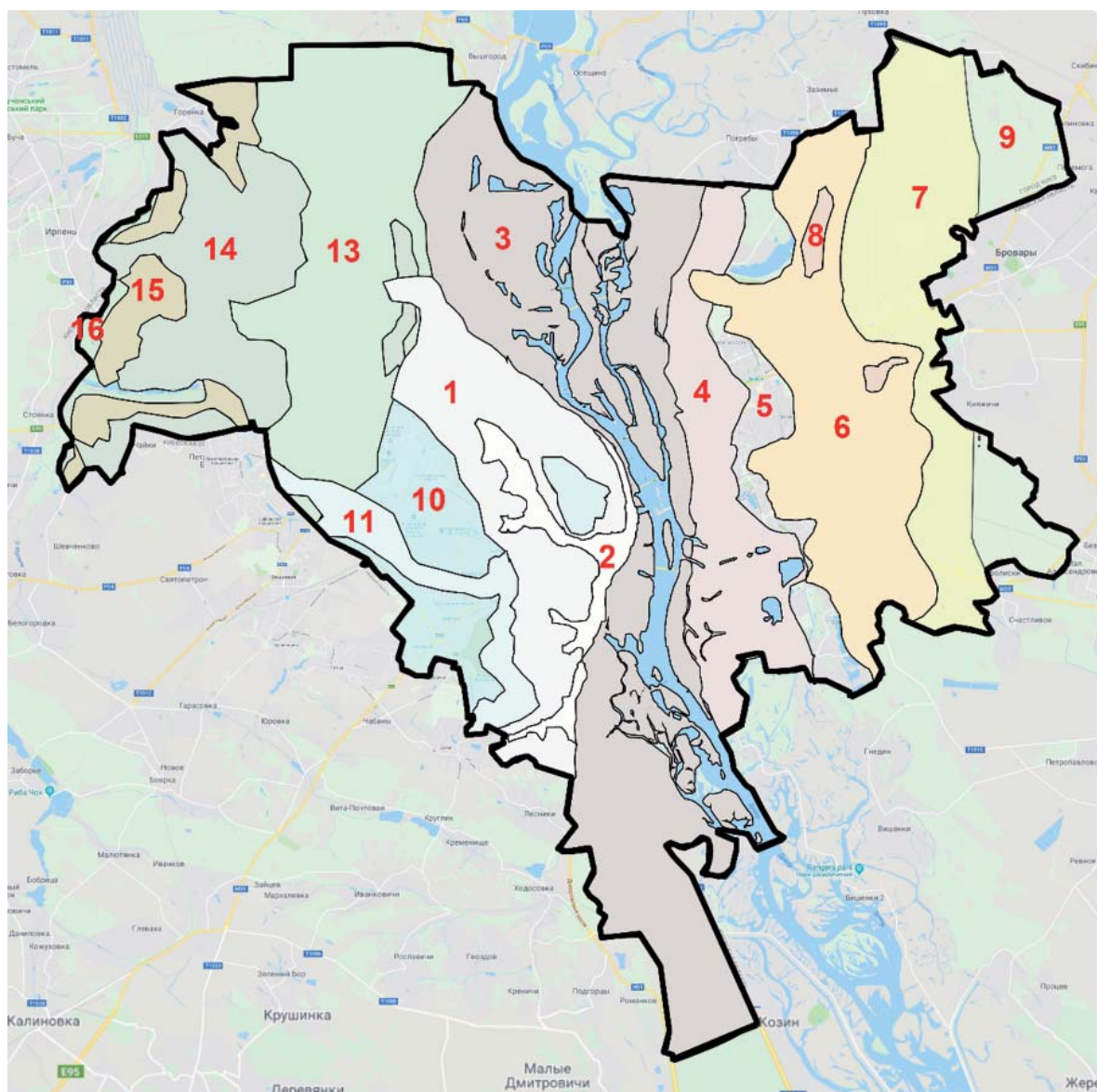


Рис. 1. Карта таксонометрических зон, выделенных методом сейсмогеологических аналогий в пределах территории Киева.

Fig. 1. A map of taxonomic zones allocated by the method of seismogeological analogues within the limits of Kiev territory.

состав и продолжительность колебаний в различных цугах сейсмических волн.

Для расчета частотных характеристик сейсмогеологических моделей 16 таксонометрических зон, выделенных на территории города, было отобрано 26 входных движений в виде акселерограмм, зарегистрированных на скальных отложениях с различным спектральным составом и разной продолжительностью. Амплитудно-частотный состав колебаний на свободной

поверхности для каждого участка зонирования определялся путем перерасчета входных движений с нижнего полупространства через сейсмогеологические модели, аппроксимирующие геологические разрезы каждой зоны.

Для учета нелинейного деформирования грунта был использован метод эквивалентного линейного моделирования с использованием программного продукта ProShake [Schnabel et al., 1972; ProShake ...,

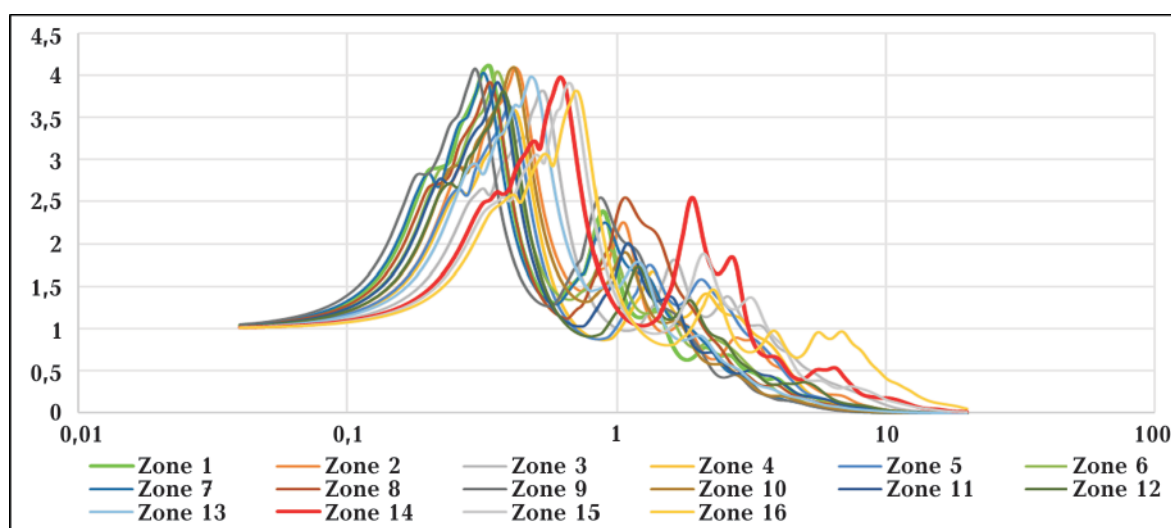


Рис. 2. Частотные характеристики грунтовой толщи 16 таксонометрических зон в пределах территории Киева.

Fig. 2. Frequency characteristics of ground stratum of 16 taxonomic zones within Kiev territory.

1998]. В результате для каждой сейсмогеологической модели (таксонометрической зоны) рассчитана частотная характеристика грунтовой толщи (рис. 2).

Из анализа рассчитанных частотных характеристик, представленных на рис. 3, видно, что они имеют сходство: два максимума, первый — четкий с коэффициентом усиления около 4, второй — четкий только для некоторых зон (например, для зон 8 и 9). На частотных характеристиках грунтовой толщи зоны 13 и 16 видно, что второй максимум на них почти отсутствует. Обобщая описание частотных характеристик, представленных на рис. 2, можно утверждать, что они имеют схожую форму с некоторыми смещениями пиковых значений по частоте.

На следующем этапе рассчитывалась усредненная амплитудно-частотная характеристика для грунтовых условий территории Киева, как функция распределения средних значений коэффициента спектрального усиления сейсмических колебаний всех зон по частоте.

Для каждой амплитудно-частотной характеристики рассчитаны интегральные коэффициенты спектрального усиления. Под интегральным коэффициентом спектрального усиления в данном случае

принимается площадь подспектральной функции. Преимущество интегрального коэффициента усиления по сравнению с максимальным заключается в том, что учитывается вклад каждой частоты в общую дисперсию. Для расчета интегрального коэффициента усиления использовался метод численного интегрирования Симпсона в интервале интегрирования от 0 до 20 Гц (инженерный частотный диапазон) с шагом интегрирования 0,02 Гц. На каждом шаге интегрирования использовалась квадратурная формула Симпсона:

$$\int_{x_0}^{x_2} P_2(x) dx = \int_0^{2h} P_2(z) dz = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + f_2),$$

где h — шаг интегрирования 0,02 Гц.

На следующем шаге для каждой зоны были рассчитаны отклонения интегрального коэффициента усиления от среднего значения, т. е. от интегрального коэффициента усредненной амплитудно-частотной характеристики для грунтовых условий территории Киева. Отклонение рассчитывалось как частное между интегральным коэффициентом усиления колебаний почвами каждого участка зонирования и усредненным интегральным коэффициентом усиления (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Отклонение интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний от среднего значения для 16 таксонометрических зон территории Киева

Зона	Отклонение	Зона	Отклонение	Зона	Отклонение	Зона	Отклонение
1	0,79	5	0,99	9	0,72	13	0,79
2	1,00	6	0,76	10	0,72	14	1,47
3	1,27	7	0,72	11	0,81	15	1,40
4	0,99	8	0,87	12	0,87	16	1,85

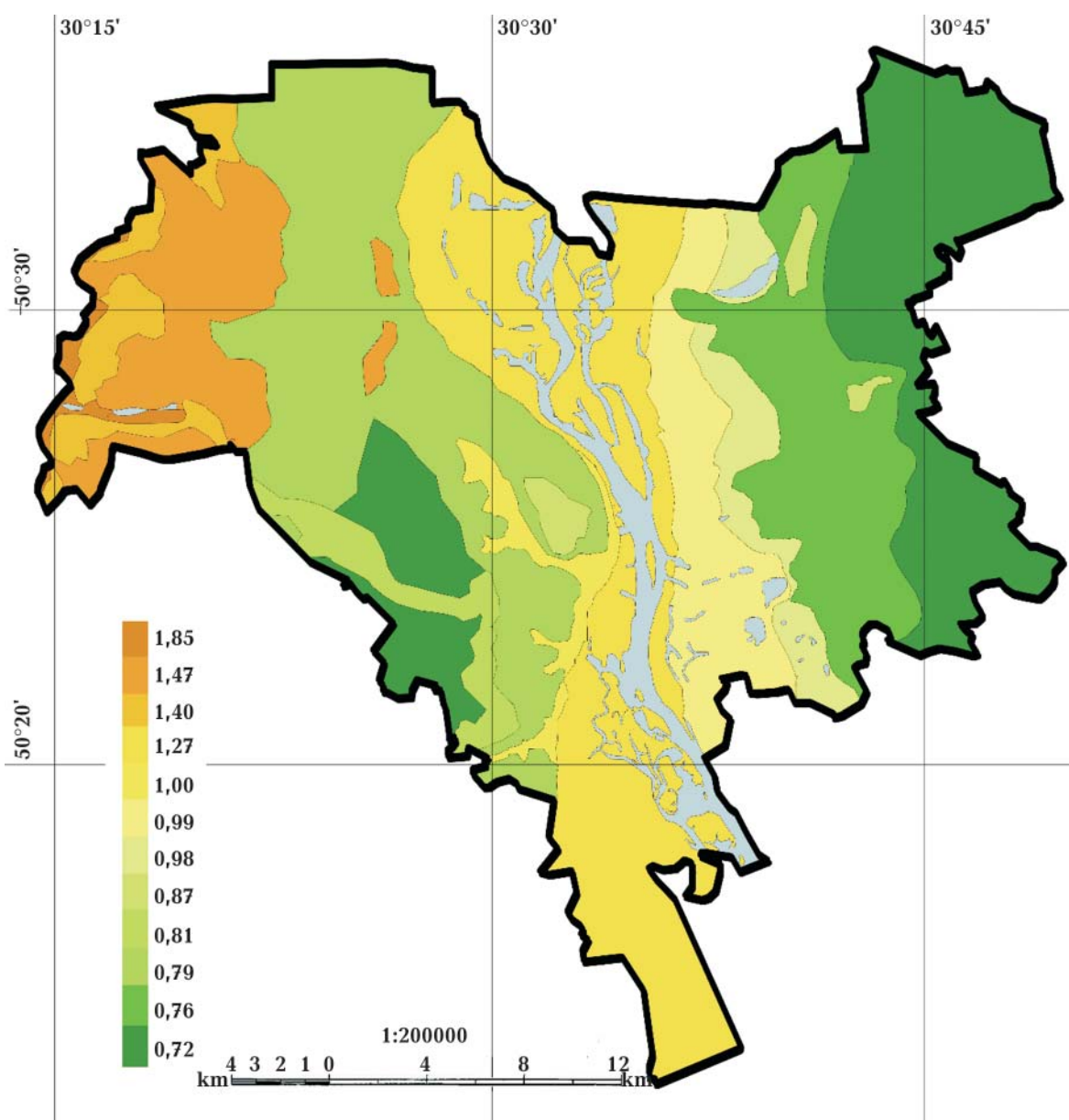


Рис. 3. Карта распределения отклонения интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний от среднего значения для территории Киева.

Fig. 3. A map of distribution of deviation of integral coefficient of amplification by the grounds of seismic vibrations from average values for Kiev territory.

Карта, представленная на рис. 3, показывает распределение по территории Киева количественной оценки влияния спектральных характеристик местных грунтов на сейсмическую опасность, выраженную системными физическими величинами. Из таблицы видно, что для некоторых таксонометрических зон значение отклонения интегрального коэффициента усиления от среднего значения одинаково. Таким образом, на карте территории Киева на рис. 3 выделено всего 12 зон с различными значениями отклонения интегрального коэффициента усиления от среднего. Построенную карту предлагается использовать для применения спектрального метода расчета на аварийное сочетание нагрузок с учетом сейсмического воздействия, для внесения поправок в спектры сейсмических колебаний, падающих на подошву осадочного чехла или пересчитанных на условные средние грунты, для которых формируются расчетные акселерограммы и определяются спектры реакции единичных осцилляторов с заданными собственными периодами и затуханием колебаний.

Выводы. Нормативная сейсмичность территории Украины отображена на картах общего сейсмического районирования традиционно в баллах сейсмической интенсивности, в то время как инженеры-проектировщики в инженерных расчетах используют амплитудные значения параметров сейсмических колебаний грунта. В настоящее время задача сейсмического картирования в параметрах сейсмических колебаний грунта является чрезвычайно важной и первоочередной. В настоящей статье представлены методология и результаты комплексного исследования, проведенного для сейсмического районирования (зонирования) территорий населенных пунктов или агломераций в физических параметрах сейсмических движений грунта на примере территории Киева. Используется аналитически-эмпирический подход, поскольку это единственный доступный способ, который можно реализовать в условиях недостаточного количества результатов инструментальных сейсмологических

наблюдений. В пределах территории Киева методом сейсмогеологических аналогий выделены участки (таксонометрические зоны), на которых сейсмический эффект может существенно различаться. Для каждой таксонометрической зоны построена расчетная сейсмогеологическая модель с параметрами неупругого деформирования, которые позволяют учесть возникновение нелинейных эффектов при значительных сейсмических воздействиях. Методом эквивалентного линейного моделирования рассчитаны частотные характеристики сейсмогрунтовых моделей каждой таксонометрической зоны. Рассчитана усредненная амплитудно-частотная характеристика для грунтовых условий территории Киева. Построена карта распределения отклонения интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний от среднего значения для территории Киева. Под интегральным коэффициентом спектрального усиления принимается площадь подспектральной функции. Преимущество интегрального коэффициента усиления по сравнению с максимальным заключается в том, что учитывается вклад каждой частоты в общую дисперсию. Карта учитывает модели затухания сейсмических колебаний в почвах.

Построенную карту предлагается использовать при спектральном методе расчета зданий и сооружений на аварийное сочетание нагрузок с учетом сейсмического воздействия, поскольку пересчет балльности по шкале сейсмической интенсивности (по шкале MSK-64) в амплитуду колебаний грунта некорректен. Карта распределения отклонения интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний от среднего значения может использоваться для внесения поправок в спектры сейсмических колебаний, падающих на подошву осадочного чехла или пересчитанных на условные средние грунты, для которых формируются расчетные акселерограммы и определяются спектры реакции единичных осцилляторов с заданными собственными периодами и затуханием колебаний. Представленная в настоящей

статье карта является промежуточным этапом при построении карт сейсмического зонирования Киева в физических терминах колебаний грунта: пиковых ускорениях (PGA), пиковых скоростях (PGV) или пико-

вых смещениях (PGD). Сейсмическое зонирование территории Киева в единицах пиковых ускорений грунта позволит более обоснованно проводить расчет зданий и сооружений на сейсмические воздействия.

Список литературы

- Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. Москва: Наука и образование, 2012. 176 с.
- Гусев А.А. О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений (Ч. 1). *Инженерные изыскания*. 2011. № 10. С. 20—29.
- ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. Київ: Мінрегіобуд України, Укрархбудінформ, 2014. 110 с.
- Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика. Учебник для вузов. Москва: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 368 с.
- Кендзера О.В. Сейсмічна небезпека і сейсмічний захист в Україні. *Український географічний журнал*. 2015. № 3. С. 9—15. <http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015>.
- Ладынин А.В. Физические свойства горных пород. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2010. 110 с.
- Національний стандарт ДСТУ-Б-В.1.1-28:2010 «Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності». Київ: Держбуд України, 2010. 78 с.
- Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. Отв. ред. О.В. Павлов. Москва: Наука, 1988. 224 с.
- Справочник физических констант горных пород. Под ред. С. Кларка мл. Москва: Мир, 1969. 543 с.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000: объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. Москва: Изд. ОИФЗ, 1999. 57 с.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика. Под ред. Н.Б. Дортман Москва: Недра, 1984. 455 с.
- De Luca, F., Chioccarelli, E., & Iervolino, I. (2011). Preliminary study of the 2011 Japan earthquake ground motion record V1.01. Retrieved from http://www.reluis.it/images/stories/Japan_EQ_GM_Report_v1.pdf.
- Goodman, R.E. (1980). *Introduction to Rock Mechanics*. New York: Wiley, 555 p.
- Ishibashi, I., & Zhang, X.J. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, 33(1), 182—191. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.182>.
- Kenzera, O., Rushchitsky, J., & Semenova, Y. (2021). Rheological Properties of Soils in Assessing the Seismic Hazard of the South Ukrainian Nuclear Power Plant. In F.L. Bonali, F. Pasquaré Mariotto, N. Tsereteli (Eds.), *Building Knowledge for Geohazard Assessment and Management in the Caucasus and other Orogenic Regions. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security* (pp. 365—373). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3_20.
- Lama, R.D., & Vutukuri, V.S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks-Testing Techniques and Results*. Trans Tech Publications.
- Lanzo, G., Pagliaroli, A., Tommasi, P., & Chiocci, F.L. (2009). Simple shear testing of sensitive very soft offshore clay for wide strain range. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1277—1288. <https://doi.org/10.1139/T09-059>.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems. (1998). Washington, USA, 54 p. Retrieved from <https://civil808.com/sites/default/files/2365.pdf>.

- Roblee, C., & Chiou, B. (2004). A proposed geindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses. *Proceedings, International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, University of California, Berkeley, CA* (pp. 1—29).
- Schnabel, P.B., Lysmer, J., & Seed, H.B. (1972). *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12*. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Seed, H.B., & Idriss, I.M. (1970). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis*. Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 48 p.
- Semenova, Yu., & Kendzera, A. (2019). Calculated accelerograms for the direct dynamic method of determining seismic loads. *Conference Proceedings, 18th International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects, May 2019* (Vol. 2019, pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902111>.

Variations in the integral amplification of of seismic ground motions on the territory of Kiev

A. Kendzera, Yu. Semenova, 2021

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kiev, Ukraine

The relevance of the research and the results presented in the article is due to the need to provide the designers of seismic-resistant construction with maps of seismic zoning of settlements and agglomerations on the territory of Ukraine in the amplitude parameters of seismic ground motions. An analytical-empirical approach to mapping is proposed on the example of the territory of Kyiv, which can be implemented in conditions of an insufficient number of results of instrumental seismological observations. This approach gives positive results provided that the territory is well studied in geological terms. Within the territory of Kyiv, using the method of seismic-geological analogies, areas (taxonomic zones) have been identified that are homogeneous in response to seismic effects. For all taxonomic zones, seismic-geological models of the soil strata were built and their spectral characteristics were calculated taking into account the nonlinear deformation of the soil. The averaged frequency response was also calculated for the ground conditions of the territory of Kyiv as a function of the distribution of the average values of the spectral amplification of seismic oscillations in frequency for all zones. A map of the distribution of the deviation of the integral amplification of seismic vibrations from the average value for the territory of Kyiv was constructed. It is proposed to use a spectral amplification map to determine the values of the calculated relative ground acceleration of the investigated site when using the spectral method for calculating the emergency combination of loads taking into account the seismic effect. The map of the distribution of the deviation of the integral amplification of seismic oscillations from the average value for the territory of Kyiv is an intermediate stage in the construction of seismic zoning maps for Kyiv in amplitude terms of ground motions.

Key words: seismic zoning; seismic hazard, peak ground acceleration; seismic effect.

References

- Aptikaev, F.F. (2012). *Instrumental scale of seismic intensity*. Moscow: Science and Education, 176 p. (in Russian).
- Gusev, A.A. (2011). On the principles of mapping seismically hazardous regions of the Russian Federation and rationing of seismic loads in

- terms of seismic accelerations (Part 1). *Inzhennyye izyskaniya*, (10), 20—29 (in Russian).
- Building in seismic regions of Ukraine: SBS V.1.1-12: 2014. (2014). Kiev: Building Ministry of Ukraine, 84 p. (in Ukrainian).
- Dobrynin, V.M., Vendelstein, B.Yu., & Kozhevnikov, D.A. (2004). *Petrophysics*. Textbook for universities. Moscow: FSUE Publ. House «Oil and Gas» Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkina, 368.
- Kendera, O.V. (2015). Seismic hazard and seismic protection in Ukraine. *Ukrayins'kyi heohrafichnyy zhurnal*, (3), 9—15. <http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015> (in Ukrainian).
- Ladynin, A.V. (2010). *Physical properties of rocks*. Novosibirsk: Novosibirsk University Press, 110 p. (in Russian).
- National standard DSTU-B-B.1.1-28: 2010 «Protection against dangerous geological processes, harmful operational impacts, fire. Seismic intensity scale». (2010). Kyiv: Derzhbud Ukrainy, 78 p. (in Ukrainian).
- Pavlov, O.V. (Ed.). (1988). *Assessment of the influence of soil conditions on seismic hazard. Methodological guide to seismic microzoning*. Moscow: Nauka, 224 p. (in Russian).
- Clark Jr., S. (Ed.). (1969). *Handbook of Physical Constants of Rocks*. Moscow: Mir, 543 p. (in Russian).
- Ulomov, V.I., & Shumilina, L.S. (1999). A set of maps for general seismic zoning of the territory of the Russian Federation — OSR-97. Scale 1: 8,000,000: explanatory note and a list of cities and towns located in earthquake-prone areas. Moscow: Published by the Joint Institute of Physics of the Earth, 57 p. (in Russian).
- Dortman, N.B. (Ed.). (1984). *Physical properties of rocks and minerals (petrophysics): Geophysics Handbook*. Moscow: Nedra, 1984.455 p. (in Russian).
- De Luca, F., Chioccarelli, E., & Iervolino, I. (2011). Preliminary study of the 2011 Japan earthquake ground motion record V1.01. Retrieved from http://www.reluis.it/images/stories/Japan_EQ_GM_Report_v1.pdf.
- Goodman, R.E. (1980). *Introduction to Rock Mechanics*. New York: Wiley, 555 p.
- Ishibashi, I., & Zhang, X.J. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, 33(1), 182—191. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.182>.
- Kendzera, O., Rushchitsky, J., & Semenova, Y. (2021). Rheological Properties of Soils in Assessing the Seismic Hazard of the South Ukrainian Nuclear Power Plant. In F.L. Bonali, F. Pasquaré Mariotto, N. Tsereteli (Eds.), *Building Knowledge for Geohazard Assessment and Management in the Caucasus and other Orogenic Regions. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security* (pp. 365—373). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3_20.
- Lama, R.D., & Vutukuri, V.S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks-Testing Techniques and Results*. Trans Tech Publications.
- Lanzo, G., Pagliaroli, A., Tommasi, P., & Chiocci, F.L. (2009). Simple shear testing of sensitive very soft offshore clay for wide strain range. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1277—1288. <https://doi.org/10.1139/T09-059>.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems. (1998). Washington, USA, 54 p. Retrieved from <https://civil808.com/sites/default/files/2365.pdf>.
- Roblee, C., & Chiou, B. (2004). A proposed geindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses. *Proceedings, International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, University of California, Berkeley, CA* (pp. 1—29).
- Schnabel, P.B., Lysmer, J., & Seed, H.B. (1972). *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12*. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Seed, H.B., & Idriss, I.M. (1970). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis*. Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 48 p.
- Semenova, Yu., & Kendzera, A. (2019). Calculated accelerograms for the direct dynamic method of determining seismic loads. *Conference Proceedings, 18th International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects, May 2019* (Vol. 2019, pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902111>.

Варіації інтегрального коефіцієнта посилення ґрунтами сейсмічних коливань на території Києва

О.В. Кендзера, Ю.В. Семенова, 2021

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Актуальність досліджень і результатів, представлених в статті, обумовлена необхідністю забезпечити проектувальників сейсмостійкого будівництва картами сейсмічного зонування населених пунктів і агломерацій на території України в амплітудних параметрах сейсмічних коливань ґрунту. Запропоновано аналітично-емпіричний підхід до картування на прикладі території Києва, який можна реалізувати в умовах недостатньої кількості даних результатів інструментальних сейсмологічних спостережень. Даний підхід дає позитивні результати за умови добре вивченої в геологічному відношенні території. У межах території Києва методом сейсмогеологічних аналогій виділені ділянки (таксонометричні зони), однорідні по реакції на сейсмічні впливи. Для всіх таксонометричних зон побудовані сейсмогеологічні моделі ґрунтової товщі і розраховані їх спектральні характеристики з урахуванням нелінійного деформування ґрунту. Розрахована усереднена частотна характеристика для ґрунтових умов території Києва як функція розподілу середніх значень коефіцієнта спектрального підсилення сейсмічних коливань всіх зон по частоті. Побудована карта розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва. Пропонується використовувати карту спектрального підсилення для визначення значень розрахункового відносного прискорення ґрунту досліджуваного майданчика при використанні спектрального методу розрахунку на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу. Карта розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта посилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва є проміжним етапом при побудові карт сейсмічного зонування Києва в амплітудних термінах коливань ґрунту.

Ключові слова: сейсмічне районування, сейсмічна небезпека, пікове прискорення ґрунту, сейсмічний ефект.