

Расчетные акселерограммы для прямого динамического метода определения сейсмических нагрузок

А. В. Кендзера, Ю. В. Семенова, 2019

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 28 мая 2019 г.

Для розрахунку сейсмостійкості об'єктів на сейсмічні навантаження прямим динамічним методом потрібні розрахункові акселерограми для конкретного будівельного майданчика. Показано, що використання акселерограм, які не враховують підсилювальні властивості ґрунту конкретної ділянки дослідження, може призвести до некоректних інженерних і конструкторських розрахунків сейсмостійкості будівель. Розглянуто питання різниці максимального прискорення при одному і тому самому вхідному русі (у вигляді акселерограм) на різних ділянках, розташованих близько одна до одної. Наведено результати моделювання підсилення одного і того самого вхідного руху ґрунтовими товщами двох різних ділянок. Ділянки мають подібну геологічну структуру. Корінні породи залягають на тій самій глибині. Географічно ділянки розташовані на відстані 10 км одна від одної у Києві на правому березі Дніпра. За таких умов при проектуванні сейсмостійких об'єктів інженери-конструктори для розрахунків поєднання аварійних навантажень з урахуванням сейсмічного впливу зазвичай використовують один і той самий набір проектних акселерограм. Згідно з результатами моделювання, підсилення ґрунту за однакового вхідного руху, навіть на близько розташованих ділянках і, на перший погляд, з подібною геологічною структурою, може суттєво різнитися. Така розбіжність зумовлена різноманіттям ґрунтових умов і особливостями поширення в них сейсмічної хвилі, тобто фільтрувальними сейсмічними властивостями ґрунтів. Використання розрахункових акселерограм, які не враховують фільтрувальні властивості ґрунтів на конкретному досліджуваному майданчику, призводить до некоректних інженерних і конструкторських розрахунків сейсмостійкості будівель. Показано, що акселерограми слід розраховувати тільки з урахуванням фільтрувальних властивостей ґрунтів для конкретних майданчиків передбачуваного сейсмостійкого будівництва, що дає змогу досягти необхідної сейсмостійкості за одночасного зниження вартості об'єкта.

Ключові слова: сейсмічне мікрорайонування, розрахункові акселерограми, прямий динамічний метод визначення сейсмічних навантажень, максимальне прискорення сейсмічних коливань ґрунту.

Введение. Широко применяемый в настоящее время спектральный метод расчета сейсмостойкости объектов утвердил в общественности ошибочное представление о том, что сейсмостойкие постройки обязательно будут более дорогими. Для расчета прямым динамическим методом сейсмических нагрузок, с учетом возможных нелинейных эффектов, идеальным было бы использование инструментальных записей ускорений грунта при прогнозируемых максимальных землетрясениях из всех опасных для площадки сейс-

моактивных зон, что в условиях Украины практически недостижимо. Реально для этого используют расчетные акселерограммы, полученные в результате теоретического моделирования на основании расчетной сейсмогеологической модели геологической среды под конкретной площадкой и набора акселерограмм, зарегистрированных на коренных породах непосредственно на площадке либо вблизи от нее и пересчитанных на кровлю фундамента. Использование расчетных акселерограмм, которые не учитывают филь-

трующие свойства грунтов на исследуемой площадке, приводит к некорректным инженерным расчетам сейсмостойкости зданий [Dhakal et al., 2019]. Расчетные акселерограммы следует рассчитывать только для конкретных площадок предполагаемого сейсмостойкого строительства, что позволит достичь необходимой сейсмостойкости при одновременном снижении стоимости объекта.

Согласно ДБН В 1.1-12:2014 [Строительство..., 2014], расчеты на аварийное сочетание нагрузок с учетом сейсмического влияния следует выполнять с использованием:

- спектрального метода;
- прямого динамического метода с использованием инструментальных записей ускорений грунта при землетрясениях или набора расчетных акселерограмм, сгенерированных для конкретной строительной или эксплуатационной площадки;
- нелинейного статичного расчета, применяемого в качестве упрощенной альтернативы нелинейному динамическому расчету реакции конструкций на землетрясения.

Идеальным решением для учета возможных нелинейных эффектов при сейсмических нагрузках прямым динамическим расчетом является использование инструментальных записей ускорений грунта при прогнозируемых максимальных землетрясениях из всех опасных для площадки сейсмоактивных зон. Однако получить такие записи в условиях Украины практически невозможно, поскольку за короткое время геолого-геофизических изысканий на исследуемой площадке в условиях относительно слабой сейсмичности зарегистрировать землетрясение, как правило, не удастся.

В любом случае, при расчетах зданий и сооружений на сейсмические воздействия прямым динамическим методом требуются акселерограммы землетрясений с характеристиками, соответствующими конкретной строительной площадке. Этот динамический расчет существенно отличается от «спектрального» метода, в котором практически все параметры сейсмической

опасности площадки задаются несистемной оценкой сейсмической интенсивности в «балах» макросейсмической шкалы. Переход от «балльности» площадки к расчетным физическим характеристикам сейсмической опасности, которые являются исходными величинами при расчете сейсмических движений в моделях зданий и сооружений, в спектральном методе осуществляется с помощью набора коэффициентов. Наличие сложных статистических зависимостей между «сейсмическими баллами» и физическими параметрами сейсмических воздействий, выраженных в единицах ускорения, скорости либо смещения, делает эти коэффициенты проблематичными, когда речь идет о конкретной строительной площадке и сложных моделях сооружений. И главное, в связи с наличием плохо объяснимых, но возведенных в ранг нормативных коэффициентов, спектральный метод исключает возможность проектирования и строительства жилья, общественных и промышленных объектов одновременно и сейсмостойкими, и недорогими. Это утвердило в среде инвесторов, проектировщиков и строителей ошибочное представление о том, что сейсмостойкие постройки обязательно будут более дорогими. Это действительно имеет место при использовании «спектрального» метода расчета сейсмических нагрузок.

В ДБН В.1.1-12:2014 [Строительство..., 2014] совершенно верно указано, что расчетные акселерограммы должны моделировать сейсмические колебания поверхности грунта при землетрясениях с близких и отдаленных сейсмоактивных зон с учетом особенностей излучения сейсмических волн из очага землетрясения, закономерностей затухания сейсмических волн с расстоянием и резонансных свойств грунтов на строительной (эксплуатационной) площадке.

К ДБН В.1.1-12:2014 [Строительство..., 2014] прилагаются акселерограммы, рекомендованные для использования в прямых динамических расчетах при проектировании зданий и сооружений на стадии, когда они еще не привязываются к площадке, с

конкретными сейсмическими, грунтовыми и морфологическими условиями.

В статье рассмотрен вопрос, насколько будут различаться *максимальные ускорения при одном и том же входном движении (в виде акселерограммы) на разных площадках, размещенных недалеко друг от друга в пределах одного города*. Исследования были проведены с использованием математического моделирования программным продуктом ProShake [Schnabel et al., 1972; ProShake..., 1998].

Математическое моделирование позволяет количественно оценить амплитудно-частотный спектр реакции геологической среды на сейсмические воздействия при сильных землетрясениях. В основу расчетов положено требование учета не одного возможного сейсмического воздействия, а совокупность воздействий с различными спектральными характеристиками, определяемыми расположением зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) относительно исследуемой площадки [Yoshida, 2015]. Сейсмические воздействия, не привязанные к конкретной строительной площадке, обычно определяются набором расчетных акселерограмм, зарегистрированных или пересчитанных на подошву осадочных отложений.

На рис. 1—3 представлены результаты моделирования горизонтальных составляющих расчетных акселерограмм, полученных в результате пересчета со скального основания на поверхность грунта строительных площадок: в Киеве по ул. Вышгородская, 45 и по просп. Воздухофлотский, 10а. Для обеих площадок при расчетах использовалось одно и то же входное движение в виде акселерограммы колебаний, заданной на скальном грунте с максимальным пиковым ускорением (peak ground acceleration (PGA)) $PGA=0,07g$.

Грунтовая толща под площадкой по ул. Вышгородская, 45 в основном составлена из песков и супесей, с 10 до 85 м наблюдаются инверсионные слои супесей (слои с пониженными скоростями). Скоростной разрез под площадкой по ул. Вышгородская, 45 представлен на рис. 4, а. В

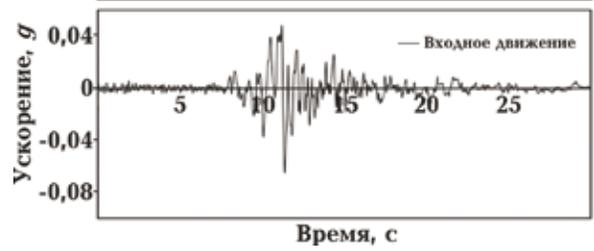


Рис. 1. Входное движение в виде акселерограммы колебаний, заданной на скальном грунте с максимальным пиковым ускорением.

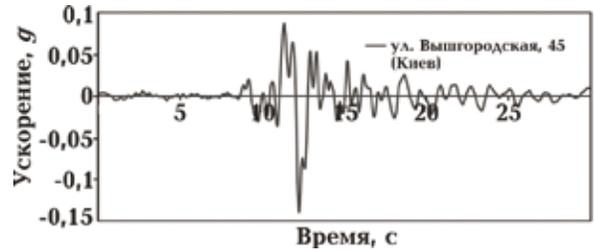


Рис. 2. Горизонтальная составляющая расчетной акселерограммы, пересчитанной со скального основания на поверхность грунта площадки по ул. Вышгородская, 45.

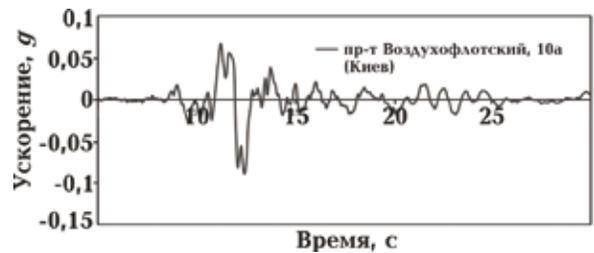


Рис. 3. Горизонтальная составляющая расчетной акселерограммы, пересчитанной со скального основания на поверхность грунта площадки по просп. Воздухофлотский, 10а.

разрезе под площадкой по просп. Воздухофлотский, 10а присутствуют преимущественно пески и глины. Также на глубине от 26 до 106 м наблюдаются инверсионные слои глины с прослоями водонасыщенного песка. Скоростной разрез под площадкой по просп. Воздухофлотский, 10а представлен на рис. 4, б.

На рис. 5 представлена зависимость изменения PGA сейсмических колебаний грунтов с глубиной при одном и том же входном движении на разных площадках по ул. Вышгородская, 45 и просп. Воздухофлотский, 10а. Видно, как изменяется PGA сейсмических колебаний с глубиной

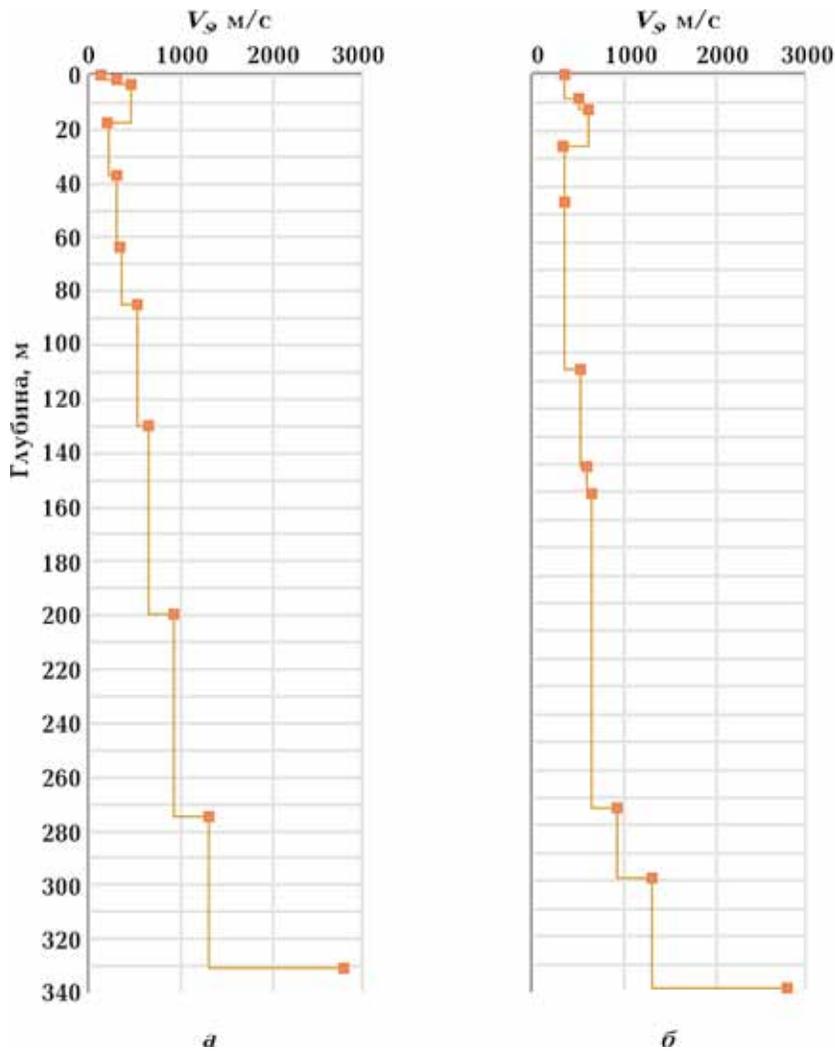


Рис. 4. Скоростной разрез под площадкой по ул. Вышгородская, 45 (а) и по просп. Воздухофлотский, 10а (б).

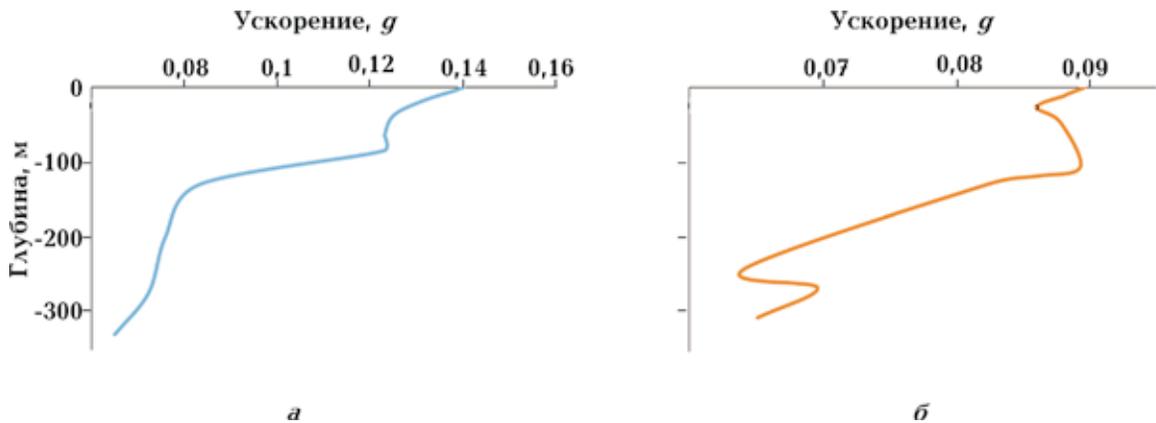


Рис. 5. Изменение максимального ускорения сейсмических колебаний с глубиной на площадке по ул. Вышгородская, 45 (а) и по просп. Воздухофлотский, 10а (б).

при одном и том же входном движении на разных площадках. Коренные породы

под обеими площадками залегают на глубине 330 м. На этой глубине PGA входного

движения равно 0,07g. Под площадкой по просп. Воздухофлотский, 10а PGA уменьшалось от 0,089 до 0,086g на глубине от 105 до 25 м. Далее, в верхнем 25-метровом слое, оно опять увеличилось до 0,090g. Под площадкой по ул. Вышгородская, 45 PGA плавно увеличивалось до 0,076g с глубины 330 до 198 м. С глубины 198 до 84,5 м наблюдается стремительное увеличение от 0,076 до 0,123g. Далее, от 84,5 до 36 м PGA незначительно изменяется до 0,125g, после чего снова наблюдается стремительное увеличение до 0,14g.

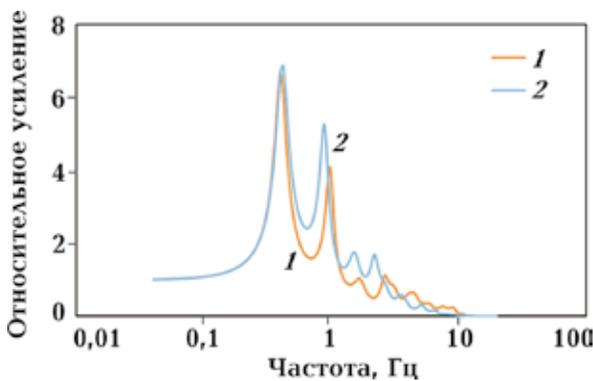


Рис. 6. Функции усиления грунтами входного движения с PGA=0,07g для площадок по ул. Вышгородская, 45 и просп. Воздухофлотский, 10а.

На рис. 6 представлены рассчитанные в результате моделирования функции усиления грунтами входного движения с PGA=0,07g на исследуемых площадках.

Анализ результатов, представленных на рис. 6, показывает, что функция усиления грунтами входного движения под обеими площадками имеет два четких максимума. Первый приходится на близкие по частоте значения. Для функции усиления грунтами под площадкой по ул. Вышгородская, 45 это значения 0,42 Гц с коэффициентом усиления 6,86, а под площадкой по просп. Воздухофлотский, 10а — 0,4 Гц с коэффициентом усиления 6,67. Второй максимум функции усиления сейсмических колебаний под площадкой по ул. Вышгородская, 45 имеет коэффициент 5,27 на частоте 0,88 Гц, по просп. Воздухофлотский, 10а коэффициент 4,08 на частоте 0,98 Гц. Другими словами, значения второго максиму-

ма обеих функций усиления существенно различаются с инженерной точки зрения.

Несмотря на то, что обе площадки размещены в одном городе и расстояние между ними всего 10 км, грунтовые условия каждой из площадок трансформируют входное движение по разным сценариям.

Анализ результатов, представленных на рис. 2—4, позволяет сделать выводы, что для прямого динамического метода расчета сейсмических воздействий необходимы расчетные акселерограммы, моделирующие землетрясения из опасных для исследуемой площадки зон ВОЗ, сгенерированные на основании реально зарегистрированных или пересчитанных на кровлю консолидированного фундамента сейсмограмм, и сейсмогеологическая модель грунтовой среды под исследуемой площадкой, которая позволит учесть возможные усиливающие и нелинейные свойства грунтов. В реальных записях слабых и средних по величине сейсмических событий нелинейные эффекты не проявляются.

При построении расчетной сейсмогеологической модели для математического моделирования влияния грунтовой толщи на сейсмические эффекты должны максимально учитываться данные о тектонике, литологии, геометрии границ, физико-механических и нелинейных свойствах грунтов площадки. Кроме того, расчеты ограничиваются возможностями вычислительных алгоритмов. В каждом случае приходится находить оптимальное соотношение между сложностью расчетной модели геологической среды и возможностями вычислительных алгоритмов для расчета движения частиц грунта в сложно построенных моделях среды при землетрясениях [Yoshida, 2015; Towhata, 2008].

В реальных средах литологические границы не всегда совпадают с границами изменения акустической жесткости. Например, два литологических слоя глины могут иметь разные возраста, цвет, содержащуюся в них фауну, условия формирования и т. д. При этом они будут обладать практически одинаковым набором физических свойств — скоростью волн и плотностью

[Budhu, 2011; Кендзера, 2017]. Граница между такими слоями не будет приводить к изменению сейсмических колебаний. Такого рода границы называются акустически прозрачными. Этот и некоторые другие факторы позволяют строить эффективные сейсмогеологические модели минимальной сложности, для которых расчетное волновое поле удовлетворительно согласуется с фактически наблюдаемым.

Выводы. В статье приведены результаты моделирования усиления одного и того же входного движения грунтовыми условиями двух разных площадок. Площадки имеют похожее геологическое строение. Коренные породы залегают на одной глубине. Географически площадки расположены на расстоянии 10 км друг от друга в г. Киеве на правом берегу Днепра. В таких условиях при проектировании сейсмостойких объектов инженеры-проектировщики для расчетов на аварийное сочетание нагрузок обычно используют один и тот же набор расчетных акселерограмм. Представленные в этой статье результаты моделирования показали, что усиление грунтами одного и того же входного движения даже на близко расположенных и, на первый взгляд, имеющих похожее геологическое строение площадках, может существенно различаться.

Таким образом, для прямого динамического метода расчета сейсмических

воздействий необходимо использовать расчетные акселерограммы, полученные для конкретной строительной (эксплуатационной) площадки. Такие акселерограммы строятся с использованием расчетной сейсмогеологической модели грунтовой среды под конкретной площадкой и записей сейсмических событий из опасных для данной площадки зон ВОЗ, зарегистрированных на коренных породах либо пересчитанные на них.

Обеспечение сейсмостойкости проектируемых либо эксплуатируемых объектов требует: создания банков инженерно-геологических данных, пополнения баз записей сейсмических событий, зарегистрированных цифровыми станциями Украины при землетрясениях с эпицентрами в местных сейсмоактивных зонах и зоне Вранча (Румыния), и дальнейшего совершенствования расчетных методов. Расчетные акселерограммы следует генерировать только для конкретных площадок предполагаемого сейсмостойкого строительства. Их применение позволит обеспечить приемлемый уровень сейсмостойкости при одновременном снижении стоимости объекта. Использование акселерограмм, которые не учитывают усиливающие свойства грунтов на конкретной исследуемой площадке, может привести к некорректным инженерным расчетам сейсмостойкости зданий.

Список литературы

- Кендзера О. В., Семенова Ю. В. Деформаційні характеристики розрахункових моделей ґрунтової товщі. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2017. № 78. С. 17—29.
- Строительство в сейсмических районах Украины: ДБН В.1.1-12:2014. Киев: Минрегионстрой Украины, 2014. 84 с.
- Budhu, M., (2011). *Soil Mechanics and Foundations*. 3rd ed. Wiley, Hoboken, NJ.
- Dhakal, Y. P., Kunugi, T., Kimura, T., Suzuki, W., & Aoi, S. (2019). Peak ground motions and characteristics of nonlinear site response during the 2018 Mw 6.6 Hokkaido eastern Iburu earthquake. *Earth, Planets and Space*, 71. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1038-2>.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems. Washington, USA, 1998, 54 p.
- 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.
- Towhata, I. (2008). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Yoshida, N. (2015). *Seismic Ground Response*

Designed accelerograms for the direct dynamic method of determining seismic loads

A. V. Kendzera, Yu. V. Semenova, 2019

To calculate the seismic stability of objects by the direct dynamic method of seismic loads, computed accelerograms for specified constructing site are required. The article shows that the use of accelerograms, which do not take into account the soils amplification properties of the particular study site, can lead to incorrect engineering calculations of the seismic resistance of buildings. The article considers the question of how different the maximum acceleration at the same input motion (in the form of an accelerogram) at different sites located close to each other is. The results of modeling the amplification of one and the same input motion by the soil strata of two different sites are presented. The sites have a similar geological structure. The bedrock is at the same depth. Geographically, the sites are located at a distance of 10 km from each other in Kiev on the right bank of the Dnieper. Under such conditions, when designing seismic resistant objects, design engineers for emergency load combination calculations usually use the same set of design accelerograms. The modelling results presented in this article showed that the soil amplifications of the same input motion, even closely spaced and, at first glance, sites with similar geological structure, may differ significantly. This discrepancy is due to the diversity of soil conditions and the characteristics of the seismic wave propagation in them, that is, the filtering seismic properties of soils. The use of calculated accelerograms, which do not take into account the filtering properties of soils at a particular site under study, leads to incorrect engineering calculations of the seismic resistance of buildings. The article shows that accelerograms should be calculated only taking into account the filtering properties of soils for specific sites of the proposed seismic resistant construction, which will achieve the required seismic resistance while reducing the cost of the object.

Key words: seismic microzoning, designed accelerograms, direct dynamic method for determining seismic loads, peak ground acceleration.

References

- Kendzera, A. V., & Semenova, Yu. V. (2017). Deformation Characteristics of Computational Model of soil strata. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiya*, (78), 17—29 (in Ukrainian).
- Building in seismic regions of Ukraine: SBS V.1.1-12: 2014, (2014). Kiev: Building Ministry of Ukraine, 84 p. (in Ukrainian).
- Budhu, M., (2011). *Soil Mechanics and Foundations*. 3rd ed. Wiley, Hoboken, NJ.
- Dhakai, Y. P., Kunugi, T., Kimura, T., Suzuki, W., & Aoi, S. (2019). Peak ground motions and characteristics of nonlinear site response during the 2018 Mw 6.6 Hokkaido eastern Iburu earthquake. *Earth, Planets and Space*, 71. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1038-2>.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems. Washington, USA, 1998, 54 p.
- 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.
- Towhata, I. (2008). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Yoshida, N. (2015). *Seismic Ground Response Analysis*. Vol. 36. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. Dordrecht: Springer Netherlands, 365 p. <http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-9460-2>.