

УДК 624.042.7

DOI: [10.46698/VNC.2022.47.47.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.47.47.003)

Оригинальная статья

Характеристики сейсмического движения дневной поверхности. Их использование в сейсмостойком строительстве

Х. Х. Курбанов¹, Лин Хонг², Г. В. Сорокина³, А. М. Уздин³

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, 100025, г. Ташкент, Мирабатский район, ул. Одилходжаева, д. 1;

²Китайский нефтяной университет, Китай, 266580, г. Циндао, пр. Чанцзянсилу, д. 66;

³Петербургский государственный университет путей сообщения, Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: oofy@yandex. ru

Статья поступила: 02.07.2022, доработана: 08.08.2022, одобрена в печать: 17.08.2022

Резюме: Актуальность работы. В статье анализируются требования к расчетному сейсмическому воздействию. Прежде всего, это обеспечение запаса прочности сооружения при рассмотрении его предельных состояний. С этой точки зрения понятие схожести реального и расчетного воздействия весьма условны. По крайней мере, внешнего сходства реального и расчетного воздействия не требуется. Вместе с тем расчетное воздействие должно иметь ряд характеристик близких к реальным. **Цель работы.** В статье анализируются три группы характеристик: кинематические, энергетические и спектральные. Из кинематических характеристик детально проанализированы пиковые ускорения и коэффициент гармоничности. Установлена связь этих характеристик с преобладающим периодом воздействия на акселерограмме. Предложена новая модификация коэффициента гармоничности с учетом остаточных смещений после землетрясения. **Методы работы.** Для оценки пиковых ускорений предложена методика, основанная на шкале балльности и не требующая привлечения других нормативных документов и карт ОСР. **Результаты работы.** Отмечено, что кинематические характеристики являются основными для проведения силовых расчетов на действие проектного землетрясения. В качестве энергетических характеристик рассмотрены интенсивность по Ариасу, абсолютная кумулятивная скорость, плотность сейсмической энергии, среднеквадратичные ускорения и показатель Парка-Янга. Показано, что энергетические характеристики в рамках одного балла постоянны и не зависят от спектрального состава воздействия. Получены доверительные границы для оценки интенсивности по Ариасу и абсолютной кумулятивной скорости. Отмечено, что энергетические характеристики являются определяющими для расчетов конструкций за пределами упругости на действие максимального расчетного землетрясения. При анализе спектральных характеристик помимо традиционных спектров отклика рассмотрены спектр работы сил пластического деформирования и предложенный авторами спектр повреждаемости сооружения. Первый спектр важен для расчета упругопластических систем, а второй – для расчета адаптивных систем. При моделировании спектрального состава воздействия авторы считают необходимым исходить из использования резонансных для сооружения расчетных воздействий. Уход от этого принципа должен иметь веское обоснование сейсмологов, которые, наряду с инженерами-проектировщиками должны нести за это финансовую и юридическую ответственность.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, моделирование, отрезок синусоиды, акселерограмма, продолжительность, энергетические критерии.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту ГФЕН-а 21-58-53012 «Теоретические основы и методы проектирования сценариев накопления повреждений при сейсмических воздействиях на примере портовых и шельфовых сооружений» и по гранту национального фонда естественных наук КНР №52111530036 «Study on the evolution of seismic damage scenarios and limit state of offshore platforms». Авторы выражают благодарность А.А. Долгой и С.В. Прокоповичу за помощь в работе.

Для цитирования: Курбанов Х. Х., Лин Хонг, Сорокина Г. В., Уздин А. М. Характеристики сейсмического движения дневной поверхности. Их использование в сейсмостойком строительстве. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (3): 34-60. DOI: 10.46698/VNC. 2022.47.47.003.

GEOPHYSICS

[DOI: 10.46698/VNC. 2022.47.47.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.47.47.003)

Original paper

Characteristics of the seismic movement of the day surface. Their use in earthquake engineering

Kh. Kh. Kurbanov¹, Lin Hong², G. V. Sorokina³, A. M. Uzdin³

¹Toshkent Davlat Transport Universitet, 1 Odikhodzhaev street, Tashkent 100025, Uzbekistan;

²China University of Petroleum, 66 West Changjiang Road, Huangdao District, Qindao 266580, China;

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint-Petersburg 190031, Russian Federation, e-mail: oofy@yandex. ru

Received: 02.08.2022, revised: 08.08.2022, accepted: 17.08.2022

Abstract: Relevance. The paper analyzes requirements for the design seismic input. First of all, it is ensuring the structure safety margin when considering its limiting states. From this point of view, the concept of similarity between real and design actions is rather indefinite. At least, no external similarity between the real and the design actions is required. At the same time, the design action should have a number of characteristics close to real ones. **Aim.** The paper analyzes three groups of such characteristics: kinematic, energy and spectral ones. Out of the kinematic characteristics, the peak accelerations and the harmonic coefficient are analyzed in detail. The relationship of these characteristics with the input predominant period on the accelerogram has been established. A new modification of the harmonic coefficient is proposed, taking into account the residual displacements after the earthquake. **Methods.** To assess peak accelerations, the authors proposed a method based on a scale of earthquake intensity, which does not require the use of other regulatory documents and seismic zoning maps. **Results.** It is noted that the kinematic characteristics are the main ones for carrying out force calculations of structures under the action of a design earthquake. The Arias intensity, absolute cumulative velocity, seismic energy density, root-mean-square acceleration and Park-Young indicator are considered as energy characteristics. It is shown that the energy characteristics in the frame of the same seismic intensity are constant and do not depend on the action spectral composition. Confidence limits for the Arias intensity and absolute cumulative velocity estimates were obtained. It is noted that the energy characteristics are important for calculations of structures out of elasticity area under maximum design earthquake. When considering the spectra, besides the response spectra, the spectrum of the work of plastic deformation forces and the spectrum of structure damageability are considered. The former spectrum is important for calculating elastoplastic systems, and the latter one is important for calculating adaptive systems. When modeling the action spectral composition, it is necessary to use resonant design input for the calculated structure. A contravention of this requirement must have a strong rationale for seismologists, who must bear financial and legal responsibility for this solution.

Key words: seismic action, modeling, sinusoidal segment, accelerations, duration, energy criteria.

Acknowledgment: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under the SFNS-a grant 21-58-53012 "Theoretical foundations and methods for designing the scenarios of damage accumulation

under seismic effects on the example of port and offshore structures” and under the grant of the National Natural Science Foundation of China No. 52111530036 “Study on the evolution of seismic damage scenarios and limit state of offshore platforms”. The authors express their gratitude to A. A. Dolgoy and S. V. Prokopovich for their help in the work.

For citation: Kurbanov Kh. Kh., Lin Hong, Sorokina G. V., Uzdin A. M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 34-60. DOI: 10.46698/VNC. 2022.47.47.003.

Введение

В настоящее время в инженерной практике все большее распространение получает расчет сооружений по акселерограммам землетрясений. В большинстве случаев он дополняет нормативный расчет по спектральной методике, но для многих современных конструкций с нелинейной диаграммой деформирования он является необходимым. Также необходим расчет сооружения по акселерограммам для обоснования сейсмостойкости новых технических решений, для которых нормативная система расчетных коэффициентов не апробирована на опыте прошлых землетрясений. К сожалению, проблема задания расчетных акселерограмм не регламентируется пока в нормативной базе, что создает проблемы при проектировании и порождает различные, иногда противоречивые подходы к заданию расчетного воздействия. В настоящее время вопросы генерации расчетных акселерограмм, как правило, решают сейсмологи. При этом они, как правило, не учитывают требования, необходимые инженеру для обеспечения безопасности сооружения. Эти требования анализируются в настоящей статье.

Основные принципы задания расчетного воздействия при расчете сооружений

Как отмечено выше, в сейсмостойком строительстве отсутствуют пока единые принципы генерации расчетных воздействий. Этот вопрос широко обсуждался в литературе [Бугаев, 1982; Вахрина, 2013; Гузеев, 2009; Давыдова и др., 2011; Ильина, Смирнова и др., 2019; Uzdin, Prokopovich, 2020; и др.], однако обсуждение не привело пока к желаемому результату. Для задания воздействия используются два, на первый взгляд противоречивых подхода.

Первый, опять же на первый взгляд естественный подход исходит из требования специалистов-сейсмологов. Расчетное воздействие должно быть максимально похожим на возможное реальное воздействие для рассматриваемой площадки строительства.

Это положение кажется очевидным чиновнику и обывателю и, поэтому, может быть весьма опасно при проектировании, о чем неоднократно говорилось в литературе [Ильина, Уздин, 2017; Uzdin, Prokopovich, 2020].

Для реализации первого подхода сейсмологами проводится большая работа. Прежде всего, оценивается сейсмическая опасность площадки строительства, далее выявляются возможные очаги землетрясений, анализируются прошлые землетрясения с похожими сейсмогеологическими условиями, проводятся расчеты распространения волн от очагов к площадке строительства и т. д. Все эти работы крайне трудоемки, дорогостоящи и требуют длительного времени для выполнения. Это позволяет использовать их только при проектировании больших и ответственных объектов. Массовое же строительство лишено таких возможностей. Кроме того,

сказывается сложившееся недоверие инженеров к сейсмологам: из 27 разрушительных землетрясений, имевших место на территории бывшего СССР, 24 произошли в районах, которые считались не сейсмичными или слабо сейсмичными [Савинов, 1978; Уздин и др., 2012]. Поэтому у инженеров сложился другой подход к моделированию воздействий. Он четко сформулирован еще в 1923 г. нашим выдающимся ученым Н. М. Герсевановым [Долгая и др., 2020] и детально описан в известной монографии В. И. Сливкера и А. В. Перельмутера [Перельмутер, Сливкер, 2002]. В силу его важности, а также в силу того, что многие молодые инженеры его не знают, мы повторим 4 основных принципа этого подхода:

1. Расчетное воздействие должно быть для сооружения более опасным, чем реальное. Иными совами, оно должно обеспечивать определенный запас прочности.
2. Расчетное воздействие должно исходить из анализируемого предельного состояния конструкции.
3. Расчетное воздействие не должно приводить к излишнему удорожанию сооружения.
4. Расчетное воздействие должно давать возможность проведения расчетного анализа поведения сооружения.

Должно ли расчетное воздействие быть внешне похожим на реальное? Абсолютно нет!

Отметим также важнейшее положение, следующее из сформулированных принципов. У конструкции всегда рассматривается несколько предельных состояний: трещины в стенах, обрушение колонн, сдвиг по основанию и т. п. Следовательно, для расчета конструкции должны использоваться несколько различных моделей расчетного воздействия. Это особенно актуально с переходом к многоуровневому проектированию [Dowric, 1977; Micov, Petrovski, 2000; Park, Paulay, 1975; и др.].

Кажется, что второй подход полностью исключает первый, а работа сейсмологов вполне бесполезна проектировщику и, во многих случаях, может нанести большой вред. Например, генерируется некоторое расчетное воздействие для 9-бтиального района. Естественно, представляется 9-тибальное воздействие и оно, по данным сейсмологов – высокочастотное. Проектировщик проектирует сейсмоизолированное сооружение, и заданное воздействие оказывается совершенно безопасным. Однако в регионе возможны относительно слабые воздействия силой 6-7 баллов, резонансные для сейсмоизолированного объекта. Они то и разрушат сооружение. Другой пример – слабодемпфированные сооружения очень чувствительны к резонансу и отклонение преобладающей частоты воздействия на 5% может изменить усилия в элементах конструкции в 3-4 раза. Сейсмологи же не могут задать частоту расчетного воздействия с такой точностью.

Однако можно исключить возникающее противоречие подходов. Все дело в термине «максимально похожий». Два воздействия можно считать похожими, если они обладают одинаковыми свойствами по отношению к объекту, на который они действуют. Поэтому центральным вопросом для оценки похожести является выделение и анализ основных свойств сейсмического воздействия, которые важны для проектировщика.

Методы работы

Методы исследования связаны с основными свойствами сейсмического воздействия. Для описания сейсмического воздействия используют различные характе-

ристики. Их можно подразделить на три большие группы: кинематические, спектральные и энергетические.

Кинематические характеристики сейсмического воздействия

К числу основных кинематических характеристик сейсмического воздействия относятся:

- пиковые ускорения, скорости и смещения (PGA, peak ground accelerations, PGV, PGD);
- остаточные смещения;
- коэффициент гармоничности k , определяемый по формуле:

$$K = \frac{y_0^{(\max)} \cdot \dot{y}_0^{(\max)}}{(\ddot{y}_0^{(\max)})^2}, \quad (1)$$

где $y_0^{(\max)}$ – максимальные пиковые смещения; $\dot{y}_0^{(\max)}$ – максимальные пиковые скорости; $\ddot{y}_0^{(\max)}$ – максимальные пиковые ускорения.

До настоящего времени кинематические характеристики, прежде всего величина PGA, считаются у инженеров и сейсмологов основными. Величина PGA нормируется как в ГОСТ (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности), так и в СП (СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах»). Правда значения ГОСТ и СП не совпадают. За 100 лет развития инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства величина PGA возросла для 9-тибалльных воздействий с 1 м/с^2 до 7 м/с^2 . Попытки увязать эту величину с макросейсмическими баллами оказались неудачными. В Европейской шкале балльности по этой причине вовсе отсутствует инструментальная часть. Этот результат представляется вполне естественным. Дело в том, что не может быть корреляции между PGA и макросейсмическим баллом. Этот вопрос широко обсуждался в литературе. Когда автомобиль проходит по мостику, на нем подпрыгивают камешки. Это значит, что их ускорение больше ускорения силы тяжести g . Однако никому в голову не придет говорить, что автомобиль создает на мосту 10-тибалльное зем-

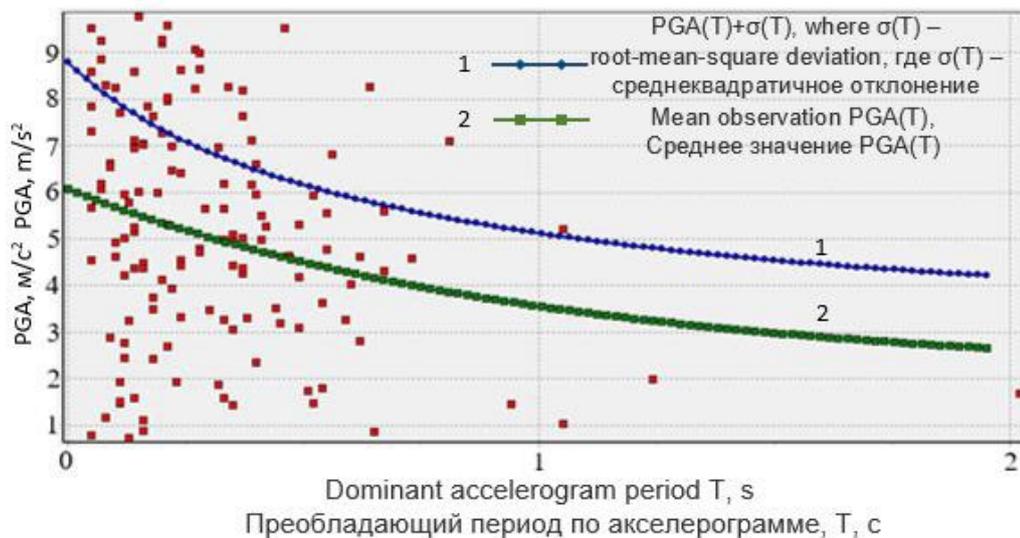


Рис. 1. Зависимость PGA от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-балльных землетрясений /

Fig. 1. Dependence of PGA on the action prevailing period T according to the processing data of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

летрясение. Нам представляется, что Ф. Ф. Аптикаев решил проблему инструментальной части шкалы балльности, приведя значения PGA в диапазоне периодов 0,3-0,5 с [Айзенберг, 1981]. Однако далее следует учитывать, что PGA существенно зависят от преобладающего периода воздействия. Этот факт отмечен еще в исследованиях О. А. Савинова при оценке сейсмостойкости сейсмоизолированных систем и отражен в публикациях его учеников [Долгая, 1994; Уздин и др., 2012; и др.]. В частности, А. А. Долгой на основе обработки около 200 записей 8-мибалльных землетрясений получена зависимость PGA (T), где T – преобладающий период на акселерограмме [Долгая, 1994]. Авторами получены аналогичные результаты при обработке 140 записей 9-тибалльных землетрясений. База записей собрана в процессе совместной работы китайских и российских специалистов [Долгая и др., 2017; Богданова и др., 2017]. Полученная зависимость представлена на рисунке 1. Она хорошо согласуется с известными рекомендациями А. А. Долгой [Долгая, 1994] и аппроксимируется формулой:

$$PGA(T) = 2,1 + 4,04 \cdot e^{-T} \quad (2)$$

Для этой кривой на рисунке 2 представлена поправка на период.

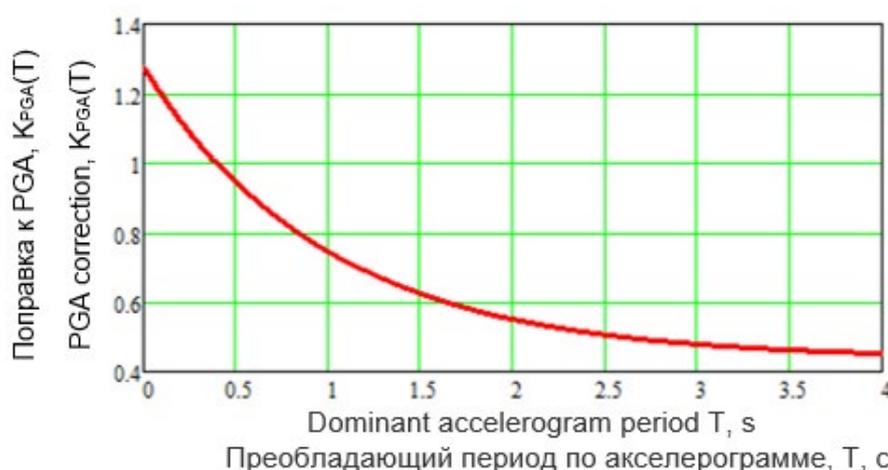


Рис. 2. Зависимость поправки PGA от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений /

Fig. 2. Dependence of the PGA correction on the action prevailing period T according to the processing data of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

При этом формула для поправки к ускорениям от периода T имеет вид:

$$K_{PGA}(T) = 0,437 + 0,84 \cdot e^{-T} \quad (3)$$

Современный Российский ГОСТ (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности) связывает PGA с балльностью следующим образом:

$$I = 2,5 \cdot \lg(PGA) + 1,89. \quad (4)$$

Используя формулы шкалы балльности [Аптикаев, 2012], (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности), нетрудно от расчетных баллов перейти к пиковым ускорениям (PGA)

$$PGA = 10^{\frac{I-1,89}{2,5}}. \quad (5)$$

А балльность I связывается с повторяемостью T известной формулой:

$$\text{Log}(T) = a \cdot I + b. \quad (6)$$

T – повторяемость землетрясения силой I баллов, a , b – константы, характеризующие сейсмическую опасность на площадке строительства.

Таким образом, действующий ГОСТ устанавливает цепочку связей:

повторяемость T ® расчетный балл I ® PGA.

В реализацию этой цепочки надо внести некоторые поправки.

Во-первых, к PGA надо ввести поправки, учитывающие фактический период воздействия. Для инженера представляет интерес именно резонансное воздействие. По этой причине, если нет веских сейсмологических данных, следует рассматривать воздействие с резонансным для сооружения периодом.

Во-вторых, инженерный анализ зависимости (6) показал ее порочность. На основании исследований, выполненных в [Герсеванов, 1923], предлагается два варианта связи повторяемости и расчетного балла. По первому варианту вид зависимости (6) сохраняется, но величина a фиксируется как $a=0,5$ (формула (7)). По второму варианту вместо (6) предлагается зависимость (8):

$$\text{Log}(T) = 0,5I + b; \quad (7)$$

$$\text{Log}(T) = ae^{-aI} + b, \text{ при } a = 0,7. \quad (8)$$

На основе приведенных результатов складывается вполне определенная картина работы заказчиков, инженеров и сейсмологов. Эта картина соответствует тому, что сложилось в настоящее время в Европейских странах.

Заказчик по представлению проектировщика задается повторяемостью предельных состояний. Заметим, что в Италии и во Франции 4 предельных состояния [Aggiornamento delle..., 2018]:

Таблица 1 / Table 1

Возможные варианты сейсмической опасности для объекта, проектируемого по карте «В» карт ОСП / Possible varieties of seismic hazard for an object designed according to the map “B” of the GSZ maps

| Ситуационная сейсмичность / Situational seismicity | | | Расчетные характеристики / Design characteristics | | | | | |
|--|-------|-------|--|------------------|---|--|------------------|---|
| I_A | I_B | I_C | СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах» / SP 14.13330.2018 “SNIP II-7-81* Construction in seismic regions” | | | По предложениям авторов / At the suggestion of the authors | | |
| | | | Повторяемость, годы / Return period, years | Балл / Magnitude | PGA, м/с ² / PGA, m/s ² | Повторяемость, годы / Return period, years | Балл / Magnitude | PGA, м/с ² / PGA, m/s ² |
| 9 | 9 | 10 | 510 | 8,49 | 4 | 770 | 8,84 | 6,67 |
| 8 | 9 | 10 | 750 | 8,49 | 4 | 770 | 8,51 | 4,09 |
| 9 | 9 | 9 | 750 | 8,49 | 4 | 770 | 8,95 | 6,12 |
| 8 | 9 | 9 | 1100 | 8,49 | 4 | 770 | 8,2 | 3,00 |

- отсутствие повреждений (Operation Limit State – SLO), допустимая повторяемость раз в 30 лет;
- возникновение повреждений без нарушения нормальной эксплуатации, при этом сооружение работает в штатном режиме (Damage Limit State), допустимая повторяемость раз в 50 лет;
- возникновение серьезных повреждений, допускающих восстановление сооружения (Ultimate Limit State), допустимая повторяемость раз в 475 лет;
- повреждения, не допускающие восстановление сооружения (Collapse Limit State), допустимая повторяемость раз в 975 лет.

1. По представленной цепочке определяется расчетный балл и PGA, которое корректируется с учетом расчетного периода воздействия. Заметим, что от сейсмологов здесь требуются данные ГОСТ и одно или два числа (а и b), входящие в формулы (6, 7). Никаких карт не требуется! Правда, значения а и b придется задавать для каждого предельного состояния.

2. Отказ от карт сейсмического районирования, как основного документа, создаваемого сейсмологами для строителей весьма актуален. Сложившийся в России порядок оценки уровня расчетного воздействия по карте ОСР приводит к парадоксам. Так, при проектировании по карте В с сейсмичностью 9 баллов возможны минимум 4 варианта ситуационной сейсмичности, приведенные в таблице 1. Для этих вариантов по предложенной методике и программе повторяемости (Арещенко Т. С., Прокопович С. В., Сабирова О. Б., Фролова Е. Д., Уздин А. М. Программа определения пиковых ускорений сейсмического воздействия. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018664350. Авторы: Уздин А. М., Прокопович С. В., Арещенко Т. С., Фролова Е. Д., Сабирова О. Б. Зарегистрирована 14 ноября 2018 г.) повторяемости, определяются расчетный балл и расчетное ускорение. Как видно из таблицы, действующие нормы, базирующиеся на картах ОСР, приводят к неравнонадежным проектам в указанных зонах. Расчетные значения PGA отличаются здесь более, чем в 2 раза.

Рассмотрение величины PGA завершим вопросом картирования этой величины. Вопрос стал модным за последние 20 лет и широко освещен в литературе [Ткаченко и др., 2017; Уломов, Богданов, 2019; Ulomov, 1999; Zaslavsky et al., 2002; и др.]. По мнению авторов, задача картирования пиковых ускорений сама по себе совершенно бессмысленна. Как уже говорилось, PGA ни в коей мере не характеризуют интенсивность сейсмического воздействия. Это хорошо понимают некоторые инженеры и сейсмологи. Интерес для проектировщика представляет карта PGA, построенная одновременно с картой преобладающих периодов. Такая работа выполнена Ю. Заславским и Шапиро для территории Израиля [Zaslavsky et al., 2002].

Перейдем теперь к двум другим кинематическим характеристикам. Это остаточные смещения y_{rez} и коэффициент гармоничности k . Остаточные смещения следует учитывать при проектировании протяженных сооружений. Сейсмологи связывают величину остаточных смещений с магнитудой и параметрами очага землетрясения. Соответствующие зависимости приведены в статье итальянского сейсмолога Fassoli [Fassoli, 2004]. Наличие остаточных смещений связано с возникновением импульса скорости на велосиграмме воздействия [Dmitrovskaya, Uzdin, 2006]. Авторы установили, что такой импульс присутствует на всех записях прошлых землетрясений [Uzdin et al., 2010]. Если величина импульса равна V , а продолжительность t , то остаточное смещение составит Vt .

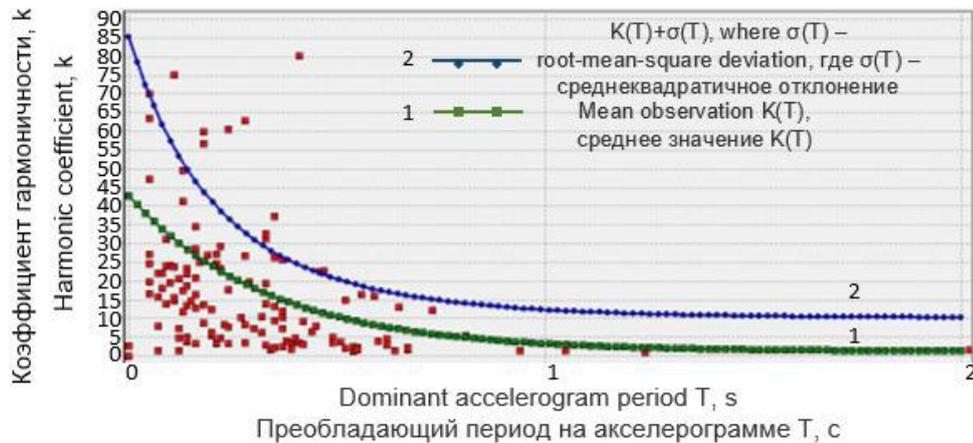


Рис. 3. Зависимость коэффициента гармоничности по результатам обработки записей 1409-тибалльных воздействий /

Fig. 3. Dependence of the harmonic ratio based on the results of processing of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

Коэффициент k представляется важнейшей кинематической характеристикой. Как отмечается в литературе, эта характеристика не позволяет сосредоточить всю энергию воздействия на одной частоте. При чисто гармоническом воздействии $k=1$. В США в нормах проектирования АЭС и морских платформ [Бирбраер, 1998] рекомендуется принимать $k=5$. Анализ записей, выполненных А. А. Долгой и О. А. Сахаровым [Bogdanova et al., 2000] еще в 2000 г. указывал на существенную зависимость величины k от преобладающего периода воздействия. Этот результат в полной мере подтверждается нашими исследованиями. На рисунке 3 приводится зависимость $k(T)$. Этот результат стыкуется с полученными ранее в [Bogdanova et al., 2000].

Как видно из рисунка 2, падение коэффициента гармоничности с ростом преобладающего периода воздействия весьма существенно. Имеющиеся данные указывают на более высокие значения k для высокочастотных воздействий. Вместе с тем при преобладающем периоде акселерограммы более 1 с его величина оказывается заметно (в 2-3 раза) ниже, чем рекомендуемая американскими нормами [Bogdanova et al., 2000].

Анализ акселерограмм с большим значением k показал, что для них характерны большие остаточные смещения, которые фактически имели место при этих землетрясениях. Авторы не стали исключать остаточные смещения из имеющихся записей, а предложили другой вариант коэффициента гармоничности:

$$K_{mod} = \frac{(y_0^{(max)} - y_{rez}) \cdot \dot{y}_0^{(max)}}{(\dot{y}_0^{(max)})^2}. \quad (9)$$

На рисунке 4 приводится зависимость $k_{mod}(T)$.

Для оценки величины k_{mod} авторы, так же, как в работах [Долгая, 1994; Уздин и др., 2012], использовали распределение Вейбулла. Параметры распределения величины k и k_{mod} при $T=0,3$ с представлены в таблице 2. Для полученных значений параметров авторы построили расчетные значения параметра k_{mod} с заданными вероятностями его превышения. Эти величины приведены в таблице³. При этом следует иметь в виду, что опасным для сооружения являются малые значения k_{mod} , поэтому в таблице приведены нижние значения доверительных границ.

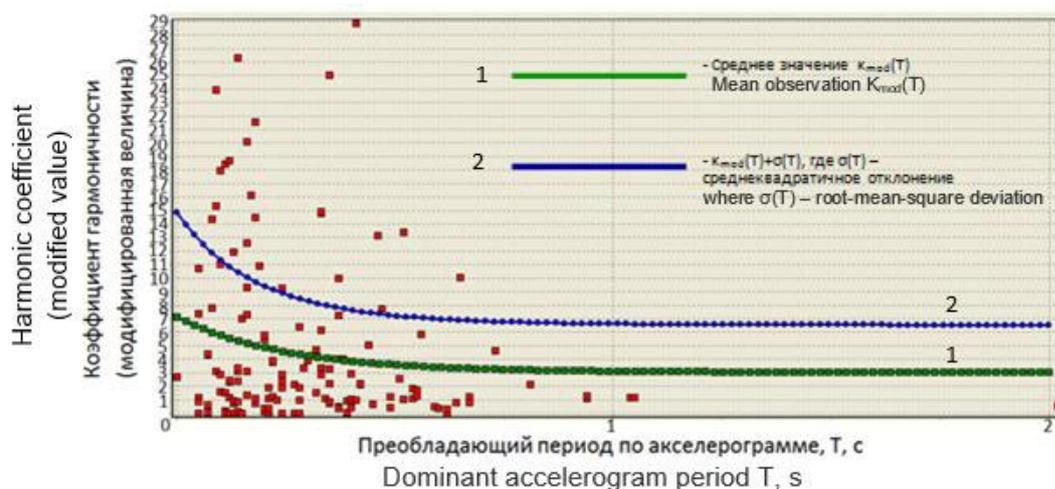


Рис. 4. Зависимость модифицированной величины коэффициента гармоничности (за вычетом остаточного смещения) по результатам обработки записей 1409-тибалльных воздействий / Fig. 4. Dependence of the modified value of the harmonic ratio (minus the residual displacement) based on the results of processing of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

Таблица 2 / Table 2

Параметры распределения k и k_{mod} при T=0,3 с / Distribution parameters k and k_{mod} at T=0.3 s

| Величина коэффициента гармоничности при T=0,3 с / The value of the harmonic ratio at T=0.3 s | Среднее значение / Average value | Среднеквадратическое отклонение / Root-mean-square deviation | Коэффициент вариации / Coefficient of variation | Параметр распределения β / Distribution parameter β |
|--|----------------------------------|--|---|---|
| Стандартная / Standard | 18,10 | 14,02 | 0,77 | 1,30 |
| Модифицированная / Modified | 7,55 | 11,06 | 1,47 | 0,70 |

Таблица 3 / Table 3

Значения величин k и k_{mod} в зависимости от вероятности их превышения при T=0,3 с / The values of k and k_{mod} depending on the probability of their exceedance at T=0.3 s

| Значения k в зависимости от вероятности их превышения при T=0,3 с / k values depending on the probability of their exceedance at T=0.3 s | | | |
|--|-------|-------|-------|
| P, % | 30 | 20 | 10 |
| Значение k / k value | 8,884 | 6,198 | 3,485 |
| Модифицированное значение k / Modified k value | 1,363 | 0,697 | 0,238 |

Энергетические характеристики сейсмического воздействия

К энергетическим характеристикам сейсмического воздействия относится большое количество характеристик, через которые можно оценить энергию сейсмического воздействия. Анализом этих характеристик начали активно заниматься последние 30 лет с развитием энергетической теории сейсмостойкости.

Классическое уравнение сейсмических колебаний одномассной системы имеет вид:

$$m\ddot{y} + Q(y, \dot{y}) + Cy = -m\ddot{y}_0, \quad (10)$$

где m – масса системы, C – жесткость системы, y – смещение массы относительно основания, y_0 – смещение основания, Q – неупругая составляющая реакции.

Если умножить обе части этого уравнения на $dy = \dot{y}dt$ и проинтегрировать по времени t от начала воздействия ($t = 0$) до его окончания ($t = \tau$), получим новое уравнение (11), которое называется уравнением энергетического баланса:

$$m \int_0^\tau \ddot{y}\dot{y}dt + \int_0^\tau Q(y, \dot{y})\dot{y}dt + \int_0^\tau Cy\dot{y}dt = -m \int_0^\tau \dot{y}_0 dt. \quad (11)$$

Первое слагаемое представляет собой работу сил инерции относительного движения, второе определяет работу сил пластического деформирования $A_{пл}$, третье – работу упругих деформаций, а правая часть – работу сил инерции переносного движения. Расчеты показывают, что первое и третье слагаемые в равенстве (11) относительно невелики. Поэтому, если работа сил инерции превзойдет работу монотонного разрушения, то возможно обрушение несущих конструкций.

• Изложенный подход явился основанием исследований по оценке интеграла в правой части уравнения (11). С этой целью использовались различные характеристики сейсмических воздействий получивших название энергетических [Рутман, 2012а, б, 2015; Erberik, Sucuoglu, 2000; Campbell, Bozorgnia, 2012; Koliopoulos et al., 1998; Uzdin et al., 2010; и др.]. Из энергетических характеристик можно выделить:

- интенсивность по Ариасу, I_A :

$$I_A = \frac{2\pi}{g} I_A^* I_A^* = \int \dot{y}^2 dt; \quad (12)$$

- абсолютная кумулятивная скорость, CAV:

$$CAV = \int |\ddot{y}| dt; \quad (13)$$

- плотность сейсмической энергии, SED:

$$SED = \int \dot{y}^2 dt; \quad (14)$$

- показатель повреждаемости Арайя (потенциал разрушительности), I_{Araya} :

$$I_{Araya} = \frac{I_A}{v_0^2}, \quad (15)$$

где v_0 – количество нулевых пересечений в акселерограмме на единицу времени.

- среднеквадратическое ускорение, σ ;
- показатель Парка-Анга (Park-Ang damage index):

$$I_c = a_{rms}^{1,5} \cdot \sqrt{t_d}. \quad (16)$$

К числу энергетических показателей можно отнести и продолжительность сейсмического воздействия τ . В [Campbell, Bozorgnia, 2012] для оценки величины τ обрезаются начальные и конечные участки, на которых $\dot{y}_0 < 0,025$ [м/с²]. В [Айзенберг, 1981] отбрасываются участки, на которых вклад в величину I_A не превосходит 2,5% от его полного значения. Величина энергетической характеристики с учётом отброшенных временных интервалов называется, согласно [Campbell, Bozorgnia, 2012], стандартной величиной характеристики. Иными словами:

$$I_{A,std} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{y}^2 dt, \quad (17),$$

причём $\int_0^{\tau_1} \dot{y}^2 dt \approx 0,025 I_A$ и $\int_{\tau_2}^{\tau} \dot{y}^2 dt \approx 0,025 I_A$.

На рисунках 5-7 представлены зависимости интенсивности по Ариасу, CAV_{STD} , интенсивности Парка-Анга от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений.

Как мы видим, интенсивность по Ариасу и величина CAV слабо меняются с ростом преобладающего периода по акселерограмме, причем величина I_A слабо убывает, а величина CAV слабо возрастает (рис. 5, 6). Этот вывод относится к стандартным значениям анализируемых величин, принятым в соответствии с рекомендациями [Айзенберг, 1981]. Среднеквадратическое отклонение при найденных аппроксимациях составило соответственно 6,84 для интенсивности по Ариасу и 21,88 по CAV . Этот результат позволяет заключить, что указанные величины можно считать постоянными. Как видно из рисунка 7, интенсивность Парка-Анга слабо убывает с ростом преобладающего периода по акселерограмме. В таблице 4 при-

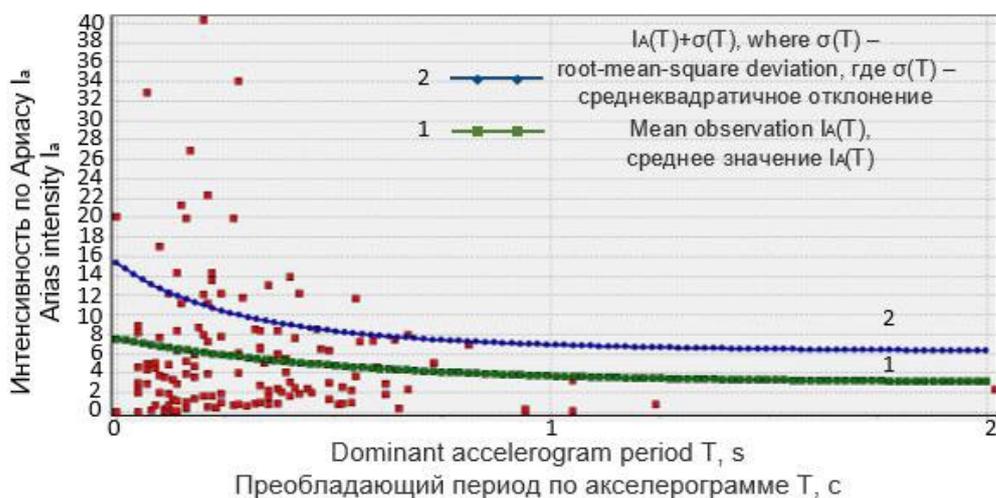


Рис. 5 Зависимость интенсивности по Ариасу от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений /

Fig. 5 Dependence of the Arias intensity on the prevailing period of influence T according to the processing data of 140 records of 9-magnitude earthquakes

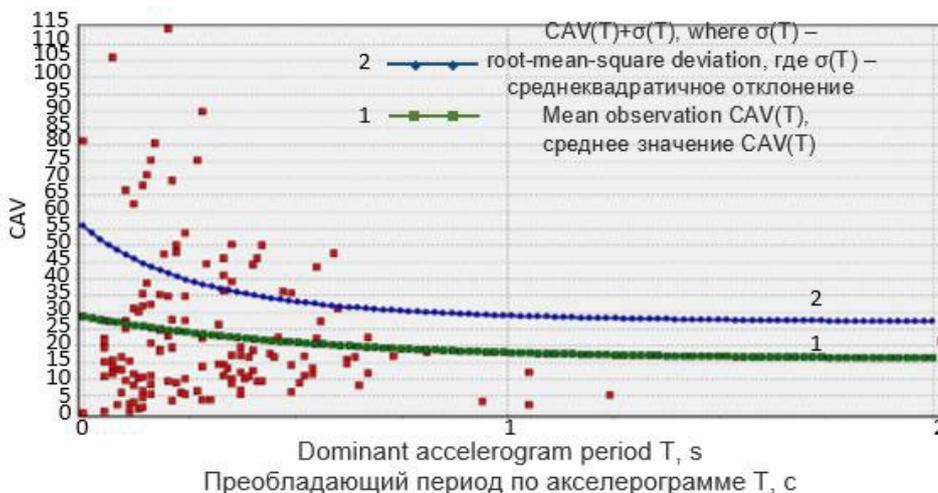


Рис. 6. Зависимость интенсивности Парка-Анга от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений /

Fig. 6. Dependence of the Park-Ang intensity on the action prevailing period T according to the processing data of 140 records of earthquakes with intensity 9 on the MSK-scale

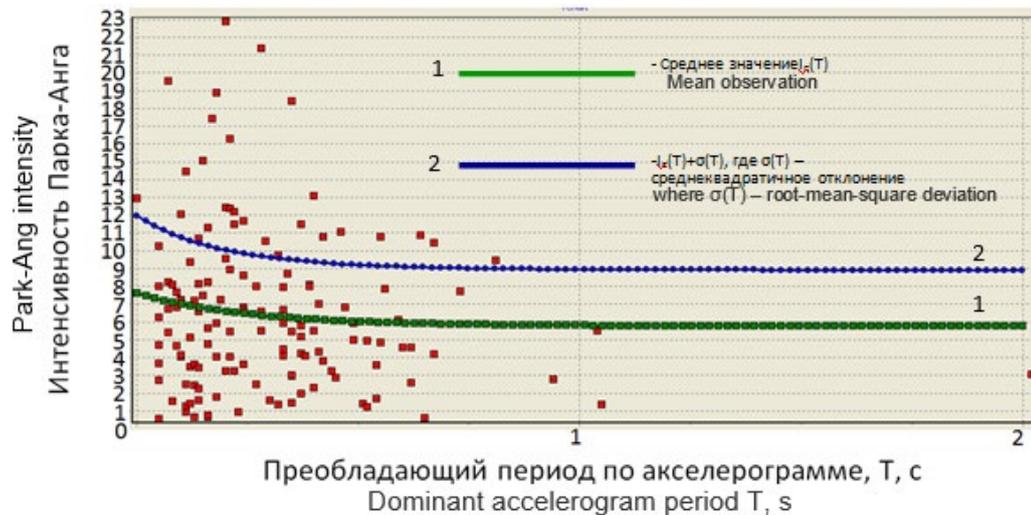


Рис. 7. Зависимость интенсивности Парка-Анга от преобладающего периода воздействия T по данным обработки 140 записей 9-тибалльных землетрясений /

Fig. 7. Dependence of the Park-Ang intensity on the prevailing period of influence T according to the processing data of 140 records of 9-magnitude earthquakes

ведены рекомендуемые значения рассматриваемых величин и их среднеквадратическое отклонение.

Для оценки энергетических характеристик авторы также использовали распределение Вейбулла. Величины постоянных энергетических характеристик при их различной обеспеченности представлены в таблице 5.

Полученный результат указывает на независимость энергетических характеристик от спектрального состава воздействия в рамках заданного макросейсмического балла. Этот факт соответствует принципу назначения балла по повреждениям

Таблица 4 / Table 4

Энергетические характеристики 9-тибалльных землетрясений / Energy characteristics of 9-magnitude earthquakes

| Характеристика / Characteristic | Среднее значение / Average value | Среднеквадратическое отклонение / Root-mean-square deviation | Коэффициент вариации / Coefficient of variation | Параметр распределения β / Distribution parameter β | Параметр распределения θ / Distribution parameter θ |
|--|----------------------------------|--|---|---|---|
| Интенсивность по Ариасу I_A / Arias intensity I_A | 5,83 | 6,84 | 1,173 | 0,856 | 5,022 |
| Абсолютная кумулятивная скорость CAV / Cumulative absolute velocity CAV | 23,95 | 21,88 | 0,91 | 1,096 | 24,791 |
| Среднеквадратическое ускорение σ_A / Root-mean-square acceleration σ_A | 1,26 | 0,58 | 0,44 | 2,28 | 1,42 |
| Интенсивность Парка-Анга I_c / Park-Ang intensity I_c | 6,47 | 4,49 | 0,69 | 1,47 | 6,01 |

Таблица 5 / Table 5

Величины постоянных энергетических характеристик при их различной обеспеченности / The values of constant energy characteristics at their different availability

| Обеспеченность, % / Availability, % | CAV, м/с / CAV, m/s | $I_A, \text{м}^2/\text{с}^3 / I_A, \text{м}^2/\text{с}^3$ | $\sigma_A, \text{м}/\text{с}^2 / \sigma_A, \text{м}/\text{с}^2$ | $I_c, \text{м}^{1.5}/\text{с}^2 / I_c, \text{м}^{1.5}/\text{с}^2$ |
|-------------------------------------|---------------------|---|---|---|
| 40 | 22,89 | 4,534 | 1,366 | 5,66 |
| 30 | 29,366 | 6,238 | 1,539 | 6,82 |
| 20 | 38,271 | 8,756 | 1,748 | 8,31 |
| 10 | 53,062 | 13,305 | 2,045 | 10,61 |

сооружений. Для повреждения зданий надо совершить работу, а для этого надо обладать энергией. Поэтому землетрясения одного балла должны иметь одинаковую энергию.

Полученные данные позволяют однозначно утверждать, что между рассмотренными энергетическими характеристиками имеется линейная зависимость. На рисунке 8 приведена зависимость CAV от интенсивности по Ариасу, а на рисунке 9 – аналогичная зависимость для величины SED.

Для среднеквадратического ускорения такая зависимость отсутствует. Это связано с тем, что первые три характеристики полностью характеризуют процесс сейсмических колебаний, учитывая как интенсивность, так и продолжительность воздействия. Что касается среднеквадратического ускорения, то оно характеризует только средние значения ускорений. По этой причине к среднеквадратическому ускорению для описания силы землетрясения необходимо задавать и продолжи-

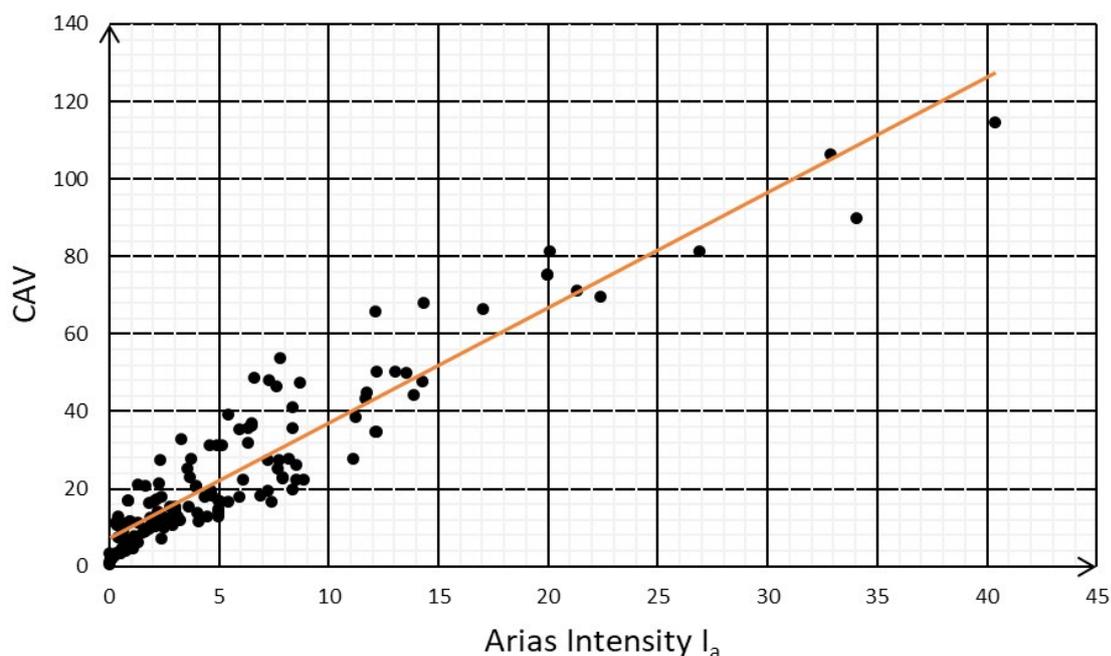


Рис. 8. Зависимость CAV от интенсивности по Ариасу /
Fig. 8. CAV dependence on Arias intensity

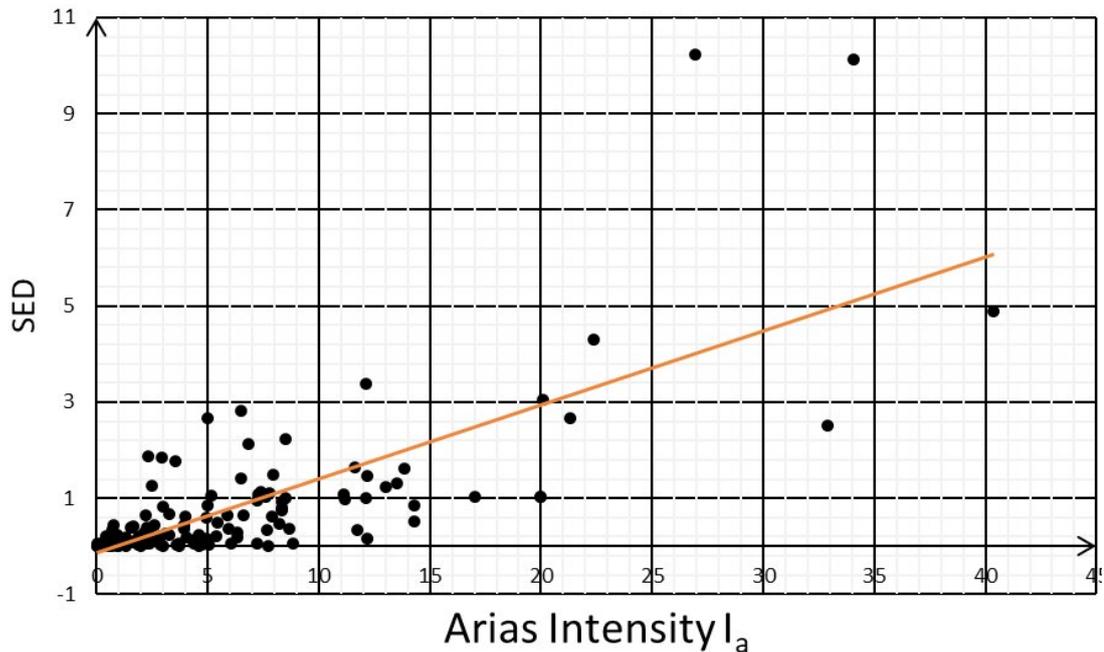


Рис. 9. Зависимость SED от интенсивности по Ариасу /
Fig. 9. SED dependence on Arias intensity

Таблица 5 / Table 5

Коэффициент регрессии / Regression coefficient

| Характеристика / Characteristic | A | B |
|---------------------------------|---------|----------|
| SED | 0,15401 | -0,14543 |
| CAV | 2,9778 | 7,157164 |

тельность воздействия.

Спектральные характеристики сейсмического воздействия

Данные характеристики определяют спектральный состав воздействия, а также реакцию сооружения в различном частотном диапазоне.

Рассмотрим сначала известные характеристики, связанные только со спектральным составом воздействия.

Простейшей спектральной характеристикой является *преобладающий период воздействия* T (преобладающая частота ω). Преобладающий период воздействия широко используется в нормативной (СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах»), учебной [Уздин и др., 2012] и научной литературе [Курбацкий, 2018]. Однако вопрос задания преобладающего периода далеко не так прост, как кажется на первый взгляд. При задании преобладающего периода чаще всего имеют в виду период, соответствующий пику на спектре ускорений акселерограммы. Между тем, преобладающие периоды акселерограммы и сейсмограммы воздействия могут существенно различаться.

Наиболее полная информация о спектральном составе землетрясения задается спектрами Фурье. Эти характеристики широко используются в литературе и проектной практике. Однако спектр Фурье не дает реакции сооружения на воздействие.

Перейдем теперь к характеристикам, определяющим реакцию сооружения на воздействие. С инженерной точки зрения более удобными оказались не спектры

Фурье, а спектры ответов маятника на рассматриваемое воздействие. Между спектрами ответа и спектрами Фурье имеется связь, рассмотренная в известной монографии [Курбацкий, 2018] и дополненная в статье [Тяпин, 2020]. Использование и особенности построения спектров хорошо описаны в литературе [Курбацкий, 2018; Тяпин, 2018]. Для расчета сооружений по ЛСМ базовым является спектр ускорений.

Сейсмологи, как правило, могут задать ожидаемый спектр на площадке строительства [Аптикаев, Эртелева, 2005], а по этому спектру могут быть сгенерированы акселерограммы. Однако следует иметь в виду, что небольшие отклонения в положении пика на спектре, могут вести к большим изменениям реакции сооружений особенно слабодемпфированных. Поэтому сложившийся подход задания спектров, как основы моделирования воздействия, даже при корректном задании амплитуды воздействия, не является консервативным и, по нашему мнению, не может использоваться при генерации расчетных акселерограмм без учета других характеристик воздействия.

К сожалению, его применение для расчета смещений весьма проблематично. Исследования показывают, что при использовании спектра ускорений для задания расчётного воздействия, смещения рискуют оказаться заниженными. При этом спектры кинематических характеристик решают задачи расчёта сооружений на проектное землетрясение, а также задачи, в которых выполняется оценка предельных смещений. Данные же по спектрам смещений реальных землетрясений до сих пор отсутствуют.

Для оценки сейсмостойкости сооружений за пределами упругости при сильных воздействиях также можно предложить спектральные характеристики воздействия. Работы этого направления ограничены. В статьях [Уздин, 2018] предложено использовать **спектры работ сил пластического деформирования** PFW (Plastic forces work – работа сил пластического деформирования), как критерий силы землетрясения. Этот подход имеет смысл использовать для оценки сейсмостойкости упругопластических систем. Для систем с хрупким механизмом накопления повреждений предложен новый тип спектров – **спектры повреждаемости** χ .

- **Спектр работ сил пластического деформирования**

Упругопластическая модель описана в [Уздин, 2018], где для определения PFW рассматривается упругопластический маятник с диаграммой Прандтля (рис. 10). Диаграмма характеризуется углом наклона α для первого участка диаграммы и пределом упругости F_{el} с предельным смещением u_{el} . Жесткость системы $C = tg\alpha$, а период колебаний при отсутствии проскальзывания $T = 2\pi/k$; где $k^2 = C/m$; m – масса системы; предел упругости удобно выразить через условный коэффициент трения $f = F_{el}/mg$.

В процессе нагружения силы пластического деформирования работают только на втором участке диаграммы.

Для построения спектра работы сил пластического деформирования $W(T)$ рассматриваются уравнения:

- на участке OA:

$$\ddot{y} + \gamma k \dot{y} + k^2 y = -\ddot{y}_0; \quad (18)$$

- на участке AB:

$$\ddot{y} + g f \text{sign}(\dot{y}) = -\ddot{y}_0. \quad (19)$$

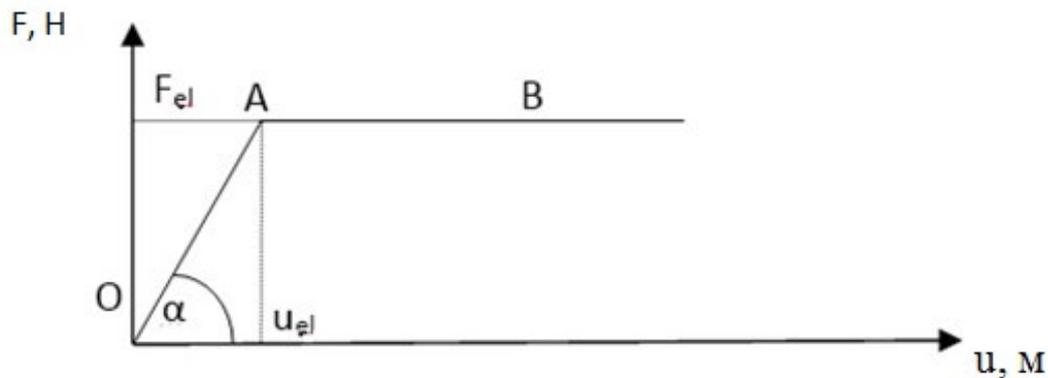


Рис. 10. Диаграмма «сила-смещение» системы для оценки силы землетрясения /
 Fig. 10. Diagram "intensity-displacement" of the system for assessing the earthquake intensity

В уравнение (18) включена сила внутреннего трения в материале, характеризующая коэффициентом неупругого сопротивления g . Значение g влияет на величину W . У объектов массовой застройки значение g изменяется в пределах от 0,08 до 0,2. Нижняя граница относится к металлическим и монолитным железобетонным конструкциям на скальных грунтах. Верхняя граница относится к жестким сооружениям на сильносжимаемых грунтах. Для оценки силы землетрясения разумно использовать сооружение-представитель с $g=0,1$, как усреднённое значение, характерное для 4-5-тиэтажных зданий на плотных нескальных основаниях [Савинов, Уздин, 1979].

Решения уравнений (18), (19) имеют стандартный вид и на участке интегрирования записываются аналитически [Уздин и др., 2012]. Интегрирование начинается на участке OA (18), а переход на участок AB происходит, если сила упругости S_y превысит предел упругости F_{el} . Возврат с участка AB на участок OA происходит при смене знака скорости массы относительно основания.

Построив спектры элементарных работ $W(T)$ для каждого f , можно определить потенциальную разрушительную способность землетрясения, что представляется объёмом фигуры, образованной поверхностью $W(T, f)$ (рис. 11).

Объём этой фигуры PFW вычисляется следующим образом:

$$PFW = \int_0^{T_{\max}} \int_0^{f_{\max}} W(T, f) dT df. \quad (20)$$

Исследования [Уздин, 2018а, б] показали, что даже при больших различиях в наиболее широко используемых характеристиках сейсмического воздействия (PGA, I_A, CAV, κ) спектры элементарных работ сил пластического деформирования $W(T)$ при равных коэффициентах условного трения f и близких значениях преобладающего периода воздействия T оказываются близкими. Это подтверждается полученной в статье [Долгая и др., 2020] зависимостью PFW от преобладающего периода T (рис. 12) для фиксированных значений, так как, согласно этой статье, работа сил пластического деформирования практически не зависит от преобладающего периода воздействия:

$$PFW(T_{bq}) = -0,008 \cdot e^{-12 \cdot T_{bq}} - 0,116 \cdot e^{-12,08 \cdot T_{bq}} - 0,259 \quad (21)$$

$$\sigma(T_{bq}) = \pm(-0,005 \cdot e^{-19 \cdot T_{bq}} - 0,08 \cdot e^{-12,079 \cdot T_{bq}} + 0,133) + PFW(T_{bq}) \quad (22)$$

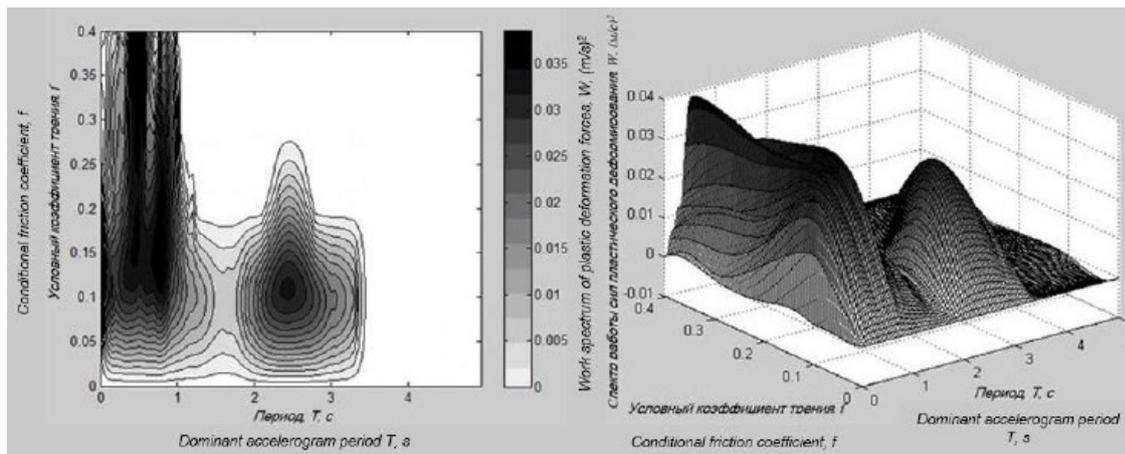


Рис. 11. Спектр работы сил пластического деформирования $W(T, f)$ /
 Fig. 11. Spectrum of work of the plastic deformation forces $W(T, f)$

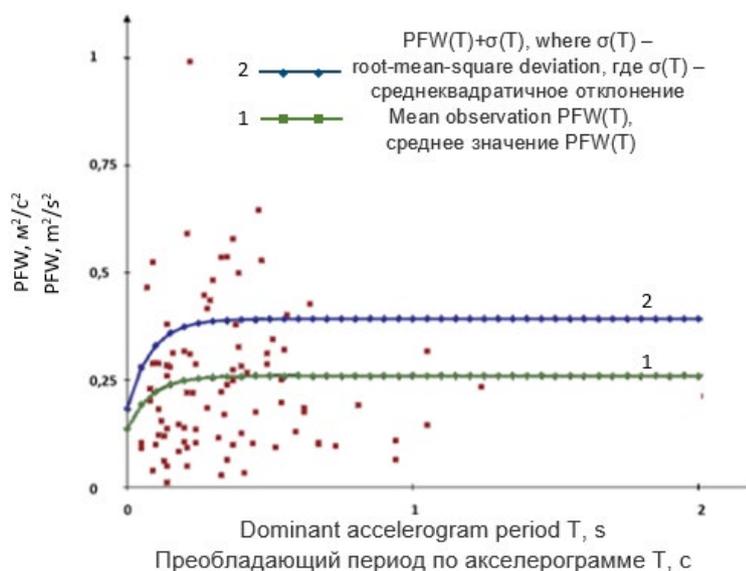


Рис. 12. Зависимость величины PFW от преобладающего периода воздействия T /
 Fig. 12. Dependence of the PFW value on the prevailing period of influence T

Предлагаемый показатель оценки сил землетрясения отражает физический смысл макросейсмического балла и не требует каких-либо условностей, связанных с установлением продолжительности землетрясения. Отсечение «безопасных» участков происходит автоматически, при этом, оно зависит от свойств сооружения. Кроме того, предлагаемый показатель дает о землетрясении больше информации, чем использование макросейсмического балла. Например, высокочастотное землетрясение на территории, застроенной гибкими сооружениями, не приведёт к большому объёму повреждений и будет охарактеризовано как слабое или умеренное. Вместе с тем, на территории, застроенной малоэтажными жесткими зданиями, это же землетрясение вызовет большой объём разрушений и будет охарактеризовано как сильное. При использовании предлагаемого показателя силы землетрясения оно само найдёт объекты, которые может разрушить, что позволяет объективно оценить его силу.

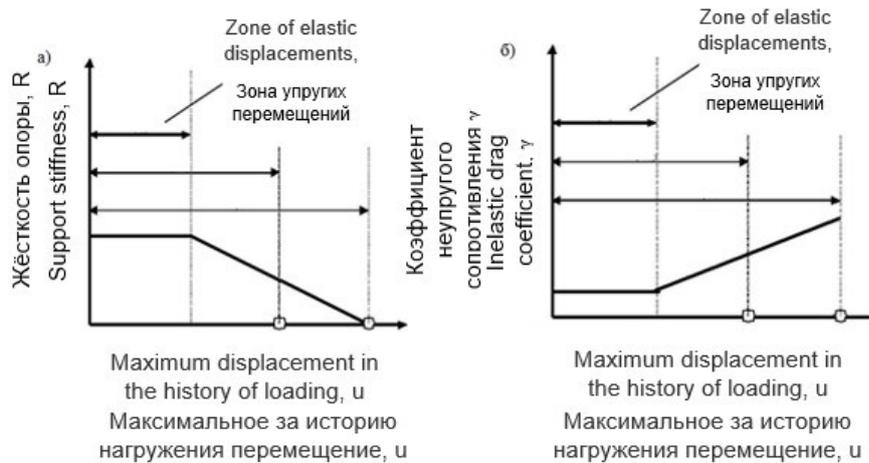


Рис. 13. Зависимость жесткости сооружения (а) и коэффициента неупругого сопротивления сооружения (б) от максимального за историю нагружения перемещения опоры /
 Fig. 13. Dependence of the structure rigidity (a) and the coefficient of inelastic resistance of the structure (b) on the maximum displacement of the support during the period of loading

• Спектры повреждаемости сейсмического воздействия

Для адаптивных систем с деградирующей жесткостью приходится использовать модель, в которой по мере накопления повреждений жесткость системы будет падать, а период основного тона колебаний и затухание в системе – возрастать.

В качестве критерия накопления повреждений используется показатель повреждаемости s и текущий период основного тона колебаний сооружения T .

Для описания процесса накопления повреждений авторы использовали простую модель Кирикова-Аманкулова [Аманкулов, 1980], в которой после начала трещинообразования жесткость линейно падает, а показатель повреждаемости и демпфирование линейно растут с ростом максимального за историю нагружения перемещения системы. Показатель повреждаемости s линейно возрастает, а период колебаний линейно падает с ростом максимального за историю нагружения перемещения системы u . Для данного типа накопления повреждений восстанавливающая сила описывается уравнением:

$$R(y) = \frac{r(u) \cdot y}{1 + k(u) \cdot y^2}, \quad (23)$$

где y – смещение опоры; u – максимальное за историю нагружения перемещение опоры; k – параметр нелинейности.

Жесткость системы постоянна, пока величина смещения u меньше предела упругости $u_{упр}$. Когда предел упругости превышен, жесткость начинает линейно падать с увеличением значения максимального за историю смещения системы. Перемещение, соответствующее нулевой жесткости системы, названо условным перемещением разрушения $u_{усл}$. Фактически, перемещение, при котором происходит разрушение сооружения, считается перемещением $u_{разр}$, при котором реакция системы достигает максимального значения. Зависимости $R(u)$ и $g(u)$ показаны на рисунке 13.

Системы с рассматриваемым типом нелинейности относятся к числу адаптивных систем, которые за счет возникновения повреждений отстраиваются от резонанса. Для таких систем Я.М. Айзенбергом введено понятие спектра состояний

системы [Айзенберг, 1981]. Система приспособляется к программе нагружения, если спектр состояний пересечёт в некоторой точке спектр реакции.

Колебания системы с деградирующей жёсткостью описываются уравнением:

$$m\ddot{y} + \gamma(u)\sqrt{r(u)m\dot{y}} + R(u) = -m\ddot{y}_0. \quad (24)$$

где y, \dot{y}, \ddot{y} – соответственно перемещение, скорость и ускорение сооружения; m – масса сооружения; $\gamma(u)$ – коэффициент неупругого сопротивления; $R(u)$ – жесткость системы; $\ddot{y}_0(t)$ – акселерограмма колебаний основания.

Интегрирование уравнения (24) осуществляется стандартными методами. Если в пределах шага интегрирования менялись характеристики системы, то ее параметры меняются в соответствии с изменением этих характеристик.

В результате можно получить зависимости конечного (после сейсмического воздействия) периода и коэффициента повреждаемости системы от начального периода ее колебаний, т. е. спектры периодов и спектры повреждаемости системы.

Результаты работы и их обсуждение

Моделирование или выбор расчетных акселерограмм проектировщик осуществляет с учетом свойств сооружения и рассмотренных характеристик воздействия.

Прежде всего инженер должен передать сейсмологу диапазон опасных для сооружения частот воздействия. Исходя из них сейсмолог передает два коэффициента a и b , определяющих связь повторяемости с расчетной балльностью в заданном частотном диапазоне. Далее, проектировщик с заказчиком определяют приемлемые повторяемости предельных состояний и по ним оценивают расчетный (дробный) балл и соответствующие значения PGA по шкале балльности с учетом поправки на частотный диапазон.

После задания пиковых ускорений можно выбирать или моделировать опасные воздействия с резонансными для сооружения частотами. При этом следует соблюдать требования к характеристикам воздействия, исходя из рассматриваемых предельных состояний конструкции.

Если, например, меня интересует работоспособность аппарата искусственного дыхания в операционной, то мне достаточно использовать величину PGA и спектр ускорений.

При расчете смещений пролетного строения относительно опоры моста инженера интересует спектр смещений. При этом если пролет соскочит с опоры на 0.0001 с, назад он уже не запрыгнет. Поэтому учет работы за пределами предельного смещения не имеет смысла. Другое дело опоры моста. Для их расчета основными являются энергетические характеристики и спектр повреждаемости. Величина PGA может быть второстепенной. Для металлических пролетных строений определяющими также являются энергетические характеристики, но оценку опасности воздействия следует оценивать с использованием спектра работы сил пластического деформирования.

Еще один интересный пример – сейсмоизолированные здания. Грамотно запроектированные сейсмоизолированные объекты не боятся больших ускорений. Для них опасны большие взаимные смещения сейсмоизолированных частей. Вплоть до обрушения сейсмоизолированное сооружение работает в упругой стадии, поэтому для него опасны длиннопериодные резонансные колебания с оценкой их опасности по спектру смещений.

Мы видим, что инженер работает с набором расчетных воздействий, соответствующих рассматриваемому предельному состоянию. При этом он оперирует критериями опасности и характеристиками воздействия, определяющими его опасность с точки зрения рассматриваемого предельного состояния. От сейсмологов инженеру нужна инструментальная часть шкалы балльности, которая в досточно удобной форме представлена в ГОСТ (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности) и два (или один) коэффициента, характеризующие повторяемость сотрясений заданной силы.

Далее инженер может самостоятельно или с привлечением сейсмологов выбрать набор расчетных акселерограмм, опасных для сооружения. Можно сгенерировать опасную акселерограмму, например, по методике, изложенной в [Смирнова, 2019].

В ряде случаев возможен своего рода конфликт прогнозов инженера и сейсмолога. Например, один из авторов столкнулся в свое время с проектом сейсмоизолированного дома в Армении. Сейсмоизоляция была относительно слабодемпфированной. Руководителю проекта сказали, что при длиннопериодных воздействиях с периодом более 1,5 с здание может упасть с опор, на что он предъявил справку АН Армянской ССР о том, что в Армении не может быть землетрясений с периодом более 0,5 с. Авторы понимают такую ситуацию. Она приводит к удешевлению конструкции и снижению сроков строительства. Но, по мнению авторов, сейсмологи должны нести полную юридическую и экономическую ответственность за свои рекомендации наряду с инженерами в случае чрезвычайной ситуации. Если их рекомендации не имеют юридической силы, соответствующая ответственность лежит на главном инженере проекта. Хорошо известен случай в Италии, когда по представлению прокурора сейсмологи должны получить реальные тюремные сроки за ошибочные прогнозы сейсмической опасности в городе Аквиле, пострадавшем после сильного землетрясения в 2009 году. Реальный срок должен получить и представитель администрации города, который, по-видимому, просил ученых не завышать сейсмическую опасность с целью экономии бюджетных средств.

Следует отметить, что есть одна важная область, в которой прогнозы сейсмологов имеют весьма большое значение. Это оценка сейсмостойкости урбанизированных территорий. Дело в том, что инженер при проектировании вынужден исходить из консервативных принципов и закладывать в конструкцию определенные запасы. Это видно из изложенного выше подхода к моделированию воздействия, аналогичная ситуация возникает с системой расчетных коэффициентов СП. Еще одним важным фактором является типовое проектирование. В СССР это был основной принцип проектирования, когда крупные институты разрабатывали типовые проекты, а на месте осуществлялась их привязка к местным условиям. Естественно типовые проекты имели определенные запасы. Например, пролетное строение моста пролетом 110 м – это грандиозное дорогостоящее сооружение. Его элементы выполняются по кондукторам. Завод не имеет возможности иметь несколько кондукторов, максимум два для сейсмостойкого и несейсмостойкого исполнения. Соответственно при проектировании закладываются запасы на возможность типового изготовления. При оценке сейсмостойкости старой застройки возникает необходимость выявить эти запасы. В том числе запасы возможно выявить (если они есть) за счет использования местных условий и региональной спектральной кривой. Здесь взаимодействие инженеров, сейсмологов и администрации особенно важно.

Выводы

Для задания расчетного сейсмического воздействия инженеру достаточно пользоваться имеющейся инструментальной частью шкалы балльности [Гузеев, 2009] и зависимостью расчетного балла от его повторяемости в рамках опасного для сооружения частотного диапазона. Последняя задается одним или двумя параметрами. Карты ОСР являются лишними и только путают проектировщика.

Сейсмическое воздействие задается опасным для сооружения, исходя из его возможных предельных состояний. При этом должны учитываться реальные характеристики сейсмического воздействия.

Для характеристики сейсмического воздействия необходимо задать большую группу кинематических, спектральных и энергетических характеристик. Как показали исследования, часть этих характеристик не зависит практически от спектрального состава воздействия. К числу таких характеристик относятся интенсивность по Ариасу, среднеквадратическое ускорение и абсолютная кумулятивная скорость. Эти величины могут быть использованы в качестве показателя силы сейсмического воздействия.

При задании PGA возникает необходимость учета зависимости этой величины от преобладающего периода воздействия. Полученные авторами результаты хорошо согласуются с известными рекомендациями А. А. Долгой и шкалой балльности (ГОСТ 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности).

Спектральные кинематические характеристики, прежде всего спектр ускорений, широко применяется в теории сейсмостойкости для определения сейсмической нагрузки. При этом PGA не характеризует силу сейсмического воздействия. Применение спектра ускорений, наряду с PGA, позволяет корректно рассчитывать только линейно-упругие системы. Однако задание упругого спектра ответа не характеризует повреждаемость сооружений от землетрясения. Для этого авторами предлагается использовать спектральные энергетические характеристики, которые позволяют оценить разрушающую способность воздействия и подобрать опасное воздействие для оценки пластических деформаций и повреждаемости сооружения.

Литература

1. Айзенберг Я. М. Спектры состояния систем с деградирующей жесткостью и их применение для оценки сейсмической реакции сооружений. // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер. 14. Сейсмостойкое строительство. – 1981. – Вып. 6. – С. 24-29.
2. Аманкулов Т. Исследование поведения одномассовой системы с нелинейностью гистерезисного типа при сейсмическом воздействии. / Т. Аманкулов, Б. А. Кириков. // Сейсмостойкое строительство. – 1980. – № 8. – С. 16-23.
3. Аптикаев Ф. Ф., Эртелева О. О. Проектные и реальные спектры реакции: проблема точности задания сейсмических воздействий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – № 1. – С. 43-45.
4. Аптикаев Ф. Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф. Ф. Аптикаев; Рос. акад. наук, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – М.: Наука и образование, 2012. – 175 с.
5. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб.: Наука, 1998. – 254 с.
6. Богданова М. А., Нестерова О. П., Никонова Н. В., Ткаченко А. С., Уздин А. М., Рахманова М., Азаев Т. М., Зайнулабидова Х. Р. Числовые характеристики сейсмических воздействий. // Наука и мир. – 2017. – № 3 (43). Т. 1. – С. 49-55
6. Бугаев Е. Г. Выбор ограниченного набора акселерограмм для проектирования уни-

фицированной АЭС и типового оборудования. // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер. 14. Сейсмостойкое строительство. – 1982. – №9. – С. 4-9.

7. Вахрина Г. Н., Смирнов В. И. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 1. – С. 29-39.

8. Герсеванов Н. М. Применение математической логики к расчету сооружений. – М.: ОНТИ, 1923. – 334 с.

9. Гузев Р. Н. Алгоритм генерации синтетических акселерограмм из условия максимального совпадения спектра отклика и нормативной кривой динамичности. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2009. – № 10. – С. 17-19.

10. Давыдова Г. В., Огнева С. В., Уздин А. М., Федорова М. Ю. Генерация расчетных акселерограмм для оценки сейсмического риска. // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2011. – №4. – С. 42-47.

11. Долгая А. А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом. // Э-И. ВНИИТПИ. Сер. «Сейсмостойкое строительство». – 1994. – Вып. 5-6. – С. 56-63.

12. Долгая А. А., Сибуль Г. А., Прокопович С. В., Уздин А. М. Энергетическая характеристика силы сейсмического воздействия. // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений». – 2020. – № 2 (45). – С. 17-23.

13. Долгая А. А., Нестерова О. П., Прокопович С. В., Уздин А. М., Чанг Юань, Гуань Юхай, Ван Хайбинь. Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений. // Российско-китайский научный журнал «Содружество». Ежемесячный научный журнал научно-практической конференции. – 2017. – № 20. Ч. 1. – С. 59-66.

14. Курбацкий Е. Н. Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения: теория и приложение. / Е. Н. Курбацкий. – М.: Сросэкспертиза, 2018. – 155 с.

15. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. – Киев: «Сталь», 2002. – 600 с.

16. Рутман Ю. Л. Анализ возможностей применения энергетического критерия SAV для расчета сейсмостойкости сооружения. / Ю. Л. Рутман, Э. Симборт. // IX Всеукраинская науч.-техн. конф. «Строительство в сейсмических районах Украины». – Киев: ДП НДІБК, 2012а. – С. 618-625.

17. Рутман Ю. Л. Анализ нагруженности сооружения на основе величины энергетического критерия интенсивности землетрясения. / Ю. Л. Рутман. // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012б. – № 2. – С. 61-63.

18. Рутман Ю. Л. Оценка сейсмической энергии, поступившей в упругопластическую систему с одной степенью свободы. / Ю. Л. Рутман, А. Д. Шивуа. // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 2 (49). – С. 64-74.

19. Савинов О. А. Сейсмогенные разрывы и оценка сейсмической опасности на участках строительства больших плотин. // В сб. «Сеймотектоника южных районов СССР». – М.: Наука, 1978. – С. 121-126.

20. Савинов О. А., Уздин А. М. Об учете грунтовых условий в расчетах на сейсмостойкость крупных инженерных сооружений. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1979. – № 6. – С. 61-65.

21. Смирнова Л. Н., Уздин А. М., Прокопович С. В. Некоторые особенности моделирования расчетных акселерограмм. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – № 1. – С. 33-41.

22. Ткаченко А. М., Нестерова О. П., Долгая А. А., Смирнова Л. Н., Уздин А. М. Карты сейсмического районирования в физических величинах – миф или реальность. Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: сб. тез. докл. X междунар. Конф. По проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, 23-25 мая 2017 г. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – 112 с., 77-79 с.

23. Тяпин А. Г. Спектры ответа и спектры Фурье: установлена ли связь между ними? // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020. – № 6 (49). – С. 47-50.
24. Тяпин А. Г. Современные нормативные подходы к расчету ответственных сооружений на сейсмические воздействия. – М.: АСВ, 2018. – 517 с.
25. Уздин А. М., Елизаров С. В., Белаш Т. А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 501 с.
26. Уздин А. М. Универсальная энергетическая характеристика землетрясения. // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018а. – № 3. – С. 23-26.
27. Уломов В. И., Богданов М. И. Новый комплекс карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012). // Инженерные изыскания. – 2013. – № 8. – С. 30-39.
28. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (18A00716). MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI. DECRETO 17 gennaio 2018. // Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 42 del 20 febbraio 2018. – Serie generale. – 2018. – No. 8. – 372 p.
29. Bogdanova G. A., Dolgaya A. A., Ivanova J. V, Sakharov O. A., Uzdin A. M. The model of seismic impact as a short temporary process for calculating of the seismoisolated systems. // 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1358, New Zealand, 2000.
30. Dmitrovskaya L. N., Uzdin A. M. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales. // First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006. – Paper Number: 32
31. Dowric D. J. Earthquake resistant Design for Engineers and architects. – New York: John Wiley & Sons, 1977.
32. Erberik M. A., Sucuoglu H. Energy-based low-cycle fatigue characteristics of degrading structures. // Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 118. – 2000.
33. Faccioli E. Displacement Spectra for Long Periods. / E. Faccioli, R. Paolucci, J. Rey // Earthquake spectra. – 2004. – Vol. 20. No. 2. – pp. 347-376.
34. Campbell K. W., Bozorgnia Y. Cumulative Absolute Velocity (CAV) and Seismic Intensity Based on the PEER-NGA Database. // Earthquake Spectra. – 2012. – Vol. 28. No. 2. – pp. 457-485.
35. Koliopoulos P. K., Margaris B. N., Klimis N. S. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. // J. of Earthq. Eng. – 1998. – Vol. 2. No. 3. – pp. 391-417.
36. Micov V. S., Petrovski J. T. Dynamic response and performance evaluation of multi-span highway bridges with displacement control. // Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 197. – 2000.
37. Park R., Paulay T. Reinforced Concrete Structures. – New York: John Wiley & Sons, 1975.
38. Ulomov V. I. and the Working Group of the GSHAP Region 7. Seismic hazard of Northern Eurasia. // AnnaliGeofis. – 1999. – Vol. 42. – pp. 1023-1038.
39. Uzdin A. M., Prokopovich S. V. Some principles of generating seismic input for calculating structures. // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 157. 0602. KTTI-2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706021>
40. Uzdin A. M., Dmitrovskaya L. N., Sakharov O. A. Setting the Level of Design Acceleration on the Basis of the Energy Theory of Earthquake Engineering. // Fourteen European Conference on Earthquake Engineering, Macedonia, Ochrid. – 2010, CD-paper № 189, Abstract Book. p. 98
41. Zaslavsky Y., Shapira A., and Kenigsberg M. Earthquake site response study for designed bridges in Israel. // The proceedings of the 12-th European conference on earthquake engineering (12-th ECEE), 9-13 September 2002, Barbican Centre, London, UK; Paper reference 059.

References

1. Aizenberg Ya.M. Spectra of the state of systems with degrading stiffness and their application to assess the seismic response of structures. Express information VNIIS. Ser. 14. Earthquake Engineering. 1981. Issue. 6. pp. 24-29. (In Russ.)
2. Amankulov T. Study of the behavior of a single-mass system with hysteresis-type nonlinearity under seismic impact. ed. T. Amankulov, B.A. Kirikov. Earthquake Engineering. 1980. No. 8. pp. 16-23. (In Russ.)
3. Aptikaev F. F., Erteleva O. O. Design and real response spectra: the problem of the accuracy of specifying seismic effects. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2005. No. 1. pp. 43-45. (In Russ.)
4. Aptikaev F. F. Instrumental scale of seismic intensity. RAS, Schmidt Institute of Physics of the Earth. Moscow. Science and education. 2012. 175 p. (In Russ.)
5. Birbraer A. N. Calculation of structures for seismic resistance. Saint Petersburg, Nauka. 1998. 254 p. (In Russ.)
6. Bogdanova M. A., Nesterova O. P., Nikonova N. V., Tkachenko A. S., Uzdin A. M. et al. Numerical characteristics of seismic impacts. Science and World. 2017. No. 3. Issue 43. Vol. 1. pp. 49-55 (In Russ.)
7. Bugaev E. G. Selection of a limited set of accelerograms for the design of a unified NPP and standard equipment. Express information VNIIS. Ser. 14. Earthquake Engineering. 1982. No. 9. pp. 4-9. (In Russ.)
8. Vakhrina G. N., Smirnov V. I. Development of models for computational accelerograms of seismic impacts. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2013. No. 1. pp. 29-39. (In Russ.)
9. Gersevanov N. M. Application of mathematical logic to the calculation of structures. Moscow. ONTI. 1923. 334 p. (In Russ.)
10. Guzeev R. N. Algorithm for generation of synthetic accelerograms from the condition of maximum coincidence of the response spectrum and the normative dynamic curve. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2009. No. 10. pp. 17-19. (In Russ.)
11. Davydova G. V., Ogneva S. V., Uzdin A. M., Fedorova M. Yu. Generation of computational accelerograms for seismic risk assessment. Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2011. No. 4. pp. 42-47. (In Russ.)
12. Dolgaya A. A. Modeling of seismic action by a short time process. E-I. VNIINTPI. Ser. Earthquake Engineering. 1994. Issue. 5-6. pp. 56-63. (In Russ.)
13. Dolgaya A. A., Sibul G. A., Prokopovich S. V., Uzdin A. M. Energy characteristic of the force of seismic action. Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2020. No. 2. Issue 45. pp. 17-23. (In Russ.)
14. Dolgaya A. A., Nesterova O. P., Prokopovich S. V., Uzdin A. M., Chang Yuan, Guan et al. Modeling of seismic effects for dynamic calculation of buildings and structures. Russian-Chinese scientific journal "Commonwealth". 2017. No. 20. Part 1. pp. 59-66. (In Russ.)
15. Kurbatsky E. N. Fourier Spectra and Earthquake Response Spectra: Theory and Application. Moscow, Srosexpertziza, 2018. 155 p. (In Russ.)
16. Perelmuter A. V., Slivker V. I. Calculation models of structures and the possibility of their analysis. Kyiv, Steel. 2002. 600 p. (In Russ.)
17. Rutman Yu. L., Simbort E. Analysis of the possibilities of using the CAV energy criterion for calculating the seismic resistance of a structure. In: IX All-Ukrainian Sc. and Tech. conf. Const. in seismic regions of Ukraine. Kyiv, DP NDIBK. 2012a. pp. 618-625. (In Russ.)
18. Rutman Yu. L. Analysis of the loading of a structure based on the value of the energy criterion of the earthquake intensity. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2012b. No. 2. pp. 61-63. (In Russ.)
19. Rutman Yu. L., Shiwua A. J. Evaluation of the seismic energy absorbed by elasto-plastic system with a single degree of freedom. Bulletin of Civil Engineers. 2015. No. 2. Issue 49. pp. 64-74. (In Russ.)

20. Savinov O.A. Seismogenic ruptures and seismic hazard assessment at large dam construction sites. In: Proceedings Seismotectonics of the southern regions of the USSR. Moscow, Nauka. 1978. pp. 121-126. (In Russ.)
21. Savinov O.A., Uzdin A.M. On the consideration of soil conditions in the calculations for the seismic resistance of large engineering structures. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 1979. No. 6. pp. 61-65. (In Russ.)
22. Smirnova L.N., Uzdin A.M., Prokopovich S.V. Some features of simulation of computational accelerograms. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2019. No. 1. pp. 33-41. (In Russ.)
23. Tkachenko A.M., Nesterova O.P., Dolgaya A.A., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Seismic zoning maps in physical value— myth or reality. In: Book of abstracts of X intl. Conf. Prob. of the str. of mat. and str. in transport, May 23-25, 2017 Saint Petersburg, FGBOU VO PGUPS, 2017. 112 pp., pp. 77-79 (In Russ.)
24. Tyapin A.G. Response spectra and Fourier spectra: do we have the link between them? Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2020. No. 6. Issue 49. pp. 47-50. (In Russ.)
25. Tyapin A.G. Modern regulatory approaches to the calculation of critical structures for seismic effects. Moscow, DIA. 2018. 517 p. (In Russ.)
26. Uzdin A. M., Elizarov S. V., Belash T.A. Seismic-resistant structures of transport buildings and structures. Educational and methodological center for education in railway transport. Moscow. 2012. 501 p. (In Russ.)
27. Uzdin A.M. Universal energy characteristic of an earthquake. Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2018a. No. 3. pp. 23-26. (In Russ.)
28. Ulomov V.I., Bogdanov M.I. A new set of the seismic zoning maps of the Russian Federation (GSZ-2012). Engineering Survey. 2013. No. 8. pp. 30-39. (In Russ.)
29. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (18A00716). Ministero Delle Infrastrutture e Dei Trasporti. Decreto 17 Gennaio 2018. Supplemento ordinario alla «Gazzetta Ufficiale» n. 42 del 20 febbraio 2018. Serie generale. 2018. No. 8. 372 p.
30. Bogdanova G.A., Dolgaya A.A., Ivanova J. V, Sakharov O.A., Uzdin A.M. The model of seismic impact as a short temporary process for calculating of the seismoisolated systems. In: 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1358, New Zealand, 2000.
31. Dmitrovskaya L.N., Uzdin A.M. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales. In: First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006. Paper Number: 32
32. Dowric D.J. Earthquake resistant Design for Engineers and architects. New York: John Wiley & Sons, 1977.
33. Erberik M.A., Sucuoglu H. Energy-based low-cycle fatigue characteristics of degrading structures. In: Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 118.2000.
34. Faccioli E., Paolucci R., Rey J. Displacement Spectra for Long Periods. Earthquake spectra. 2004. Vol. 20. No. 2. pp. 347-376.
35. Campbell K. W., Bozorgnia Y. Cumulative Absolute Velocity (CAV) and Seismic Intensity Based on the PEER-NGA Database. Earthquake Spectra. 2012. Vol. 28. No. 2. pp. 457-485.
36. Koliopoulos P.K., Margaris B.N., Klimis N.S. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. J. of Earthq. Eng. 1998. Vol. 2. No. 3. pp. 391-417.
37. Micov V.S., Petrovski J. T. Dynamic response and performance evaluation of multi-span highway bridges with displacement control. In: Proc. of 12th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 197. 2000.
38. Park R., Paulay T. Reinforced Concrete Structures. New York, John Wiley & Sons, 1975.
39. Ulomov V.I. and the Working Group of the GSHAP Region 7. Seismic hazard of Northern Eurasia. Annali Geofis. 1999. Vol. 42. pp. 1023-1038.

40. Uzdin A.M., Prokopovich S.V. Some principles of generating seismic input for calculating structures. In: E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 157. 0602. KTTI-2019. DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021

41. Uzdin A. M., Dmitrovskaya L. N., Sakharov O. A. Setting the Level of Design Acceleration on the Basis of the Energy Theory of Earthquake Engineering. In: Fourteen European Conference on Earthquake Engineering, Macedonia, Ochrid. 2010, CD-paper № 189, Abstract Book. p. 98.

42. Zaslavsky Y., Shapira A., and Kenigsberg M. Earthquake site response study for designed bridges in Israel. In: The proceedings of the 12-th European conference on earthquake engineering (12th ECEE), 9-13 September 2002, Barbican Centre, London, UK; Paper reference 059.