

# АУДИТ БЕЗОПАСНОСТИ. ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

Акбиев Р.Т., канд. техн. наук  
(ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России», г. Москва),  
Богданова М.А., инж.,  
Уздин А.М., д-р техн. наук, проф.  
(ПГУПС, г. Санкт-Петербург)

## ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ТЕРРИТОРИЙ

Предложено обобщение формул Л.В. Канторовича для оценки сейсмического риска для отдельных сооружений на расчет риска для застроенной территории. Рассмотрены случаи вновь застраиваемой территории, которая характеризуется одним классом сейсмостойкости сооружений и застроенная территория, имеющая сооружения с различным классом сейсмостойкости.

Ключевые слова: сейсмический риск, застроенные территории, класс сейсмостойкости, сооружения, ущерб, землетрясение

Понятие сейсмического риска введено в работах академика Л.В. Канторовича и его учеников [1], [2]. Позже оно развивалось в нашей стране и за рубежом, в частности в исследованиях М.А. Клячко [3], Я.М. Айзенберга [4], А.В. Перельмутера [5] и многих других специалистов. Однако большинство этих исследований рассматривало оценку риска (математического ожидания ущерба) для отдельного здания. При этом величина риска  $R$  оценивалась по формуле

$$R = \sum_{I=5}^{I_{\max}} D(K_s, I) \cdot L(I), \quad (1)$$

где  $D(K_s, I)$  — ущерб сооружению, рассчитанному на воздействие силой  $K_s$  баллов от землетрясения силой  $I$  баллов;  $L(I)$  — сотрясаемость территории землетрясениями силой  $I$  баллов [6].

Функция  $D(K_s, I)$  называется функцией уязвимости, а матрица значений  $D(K_s, I)$  — платежной матрицей. В таблицах 1-3 приведены платежные матрицы для кирпичных, каркасных и панельных зданий по данным [7].

Для избавления от учета курсов валют и процесса инфляции ущерба обычно оценивают в долях от стоимости объекта. При этом величина  $D(K_s, I)$  монотонно возрастает от 0 до 1 с ростом  $I$ . Строго говоря,  $D(K_s, I)$  является случайной величиной и описывается в литературе [8], [9]  $\beta$ -распределением. При рассмотрении множества однотипных объектов распределение приближается к нормальному [8].

Сейсмостойкость сооружения в формуле (1) характеризует величина  $K_s$ , называемая в литературе классом сейсмостойкости сооружения [10], [11].

При застройке территории возникает необходимость оценки риска для территории в целом. При этом возникает необходимость оценки риска (ущерба) для всех объектов. Стоимостное выражение риска при этом может быть описано в виде

$$R_{\text{мон}} = \sum_{\text{тип}=1}^N \left( \sum_{I=5}^{I_{\max}} D_{\text{тип}}(K_s, I) \cdot L(I) \right) \cdot C_{\text{тип}} \cdot n_{\text{тип}} \quad (2)$$

Здесь  $R_{\text{мон}}$  — денежное выражение риска. Суммирование ведется по типам объектов, причем  $C_{\text{тип}}$  и  $n_{\text{тип}}$  — стоимость и количество объектов данного типа.

Для того, чтобы получить безразмерную величину риска, изменяющуюся в диапазоне от 0 до 1, необходимо поделить величину  $R_{\text{мон}}$  на стоимость всех объектов

$$R = \frac{\sum_{\text{тип}=1}^N \left( \sum_{I=5}^{I_{\max}} D_{\text{тип}}(K_s, I) \cdot L(I) \right) \cdot C_{\text{тип}} \cdot n_{\text{тип}}}{\sum_{\text{тип}=1}^N C_{\text{тип}} \cdot n_{\text{тип}}} \quad (3)$$

В выражении (3) один из типов, например, кирпичные здания, принят за базовый с характеристиками  $C_b$  и  $N_b$ . Тогда

$$\alpha_{\text{тип}} = \frac{C_{\text{тип}}}{C_b}; \quad \mu_{\text{тип}} = \frac{N_{\text{тип}}}{N_b} \quad (4)$$

Поменяв в (3) порядок суммирования, получим

$$R = \sum_{I=5}^{I_{\max}} \left( \frac{\sum_{\text{тип}=1}^N D_{\text{тип}}(K_s, I) \cdot L(I)}{\sum_{\text{тип}=1}^N \alpha_{\text{тип}} \cdot \mu_{\text{тип}}} \right) \cdot L(I) \quad (5)$$

Т а б л и ц а 1 — Платежная матрица для кирпичных зданий

$$D0 := \begin{pmatrix} 0.03 & 2.37 & 6.60 & 27.40 & 61.80 & 121 \\ 0 & 0.42 & 4 & 17 & 47.1 & 104 \\ 0 & 0.24 & 2.9 & 10.3 & 33.6 & 69 \\ 0 & 0.12 & 1.40 & 5.8 & 17.0 & 47.08 \end{pmatrix}$$

Т а б л и ц а 2 — Платежная матрица для каркасных зданий

$$D1 := \begin{pmatrix} 0.12 & 1.98 & 10.3 & 37 & 75.7 & 121 \\ 0.03 & 0.84 & 5.8 & 11.9 & 48.3 & 104 \\ 0 & 0.42 & 4 & 15.2 & 43.9 & 78.75 \\ 0 & 0.18 & 2.40 & 9.90 & 30.5 & 65.4 \end{pmatrix}$$

Т а б л и ц а 3 — Платежная матрица для панельных зданий

$$D2 := \begin{pmatrix} 0 & 0.57 & 4.7 & 19.40 & 51 & 104 \\ 0 & 0.33 & 3.5 & 17 & 37 & 72.35 \\ 0 & 0.18 & 2.40 & 6.60 & 22.10 & 54.8 \\ 0 & 0.12 & 1.40 & 4.70 & 15.2 & 43.78 \end{pmatrix}$$

Тогда выражение в скобках в формуле (5) можно рассматривать, как функцию уязвимости для вновь застраиваемой территории

$$D_{\text{тр}}^{(\text{new})}(K_s, I) = \frac{\sum_{\text{тип}=1}^N D_{\text{тип}}(K_s, I) \cdot \alpha_{\text{тип}} \cdot \mu_{\text{тип}}}{\sum_{\text{тип}=1}^N \alpha_{\text{тип}} \cdot \mu_{\text{тип}}} \quad (6)$$

В таблице 4 и на рисунке 1 представлена функция риска, построенная для территории в которой имеются кирпичные, панельные и каркасные здания, причем показатели  $\alpha$  и  $\mu$  приняты следующими

$$\alpha = \{1, 0.8, 0.6\}; \quad \mu = \{1, 0.3, 2\}. \quad (7)$$

При оценке риска для застроенной территории приходится учитывать, что на ней могут эксплуатироваться здания одного типа с разной сейсмостойкостью. При этом

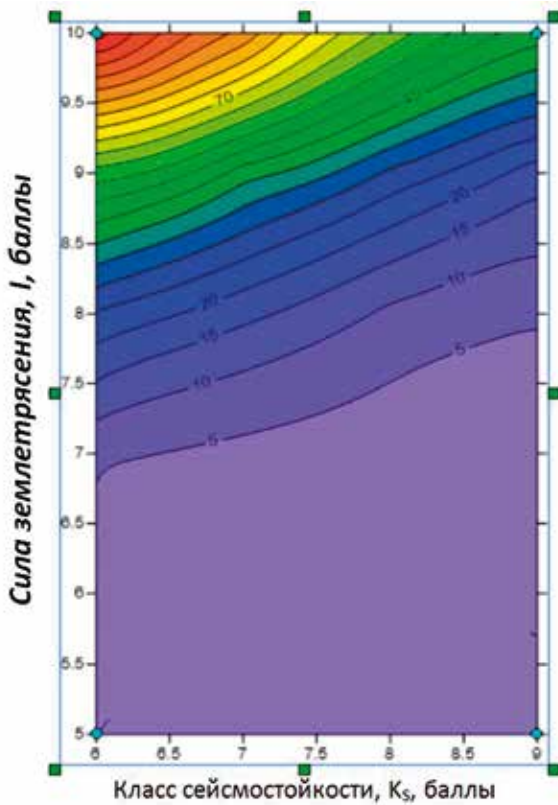


Рисунок 1 — Вид функции уязвимости для территории (% стоимости застройки)

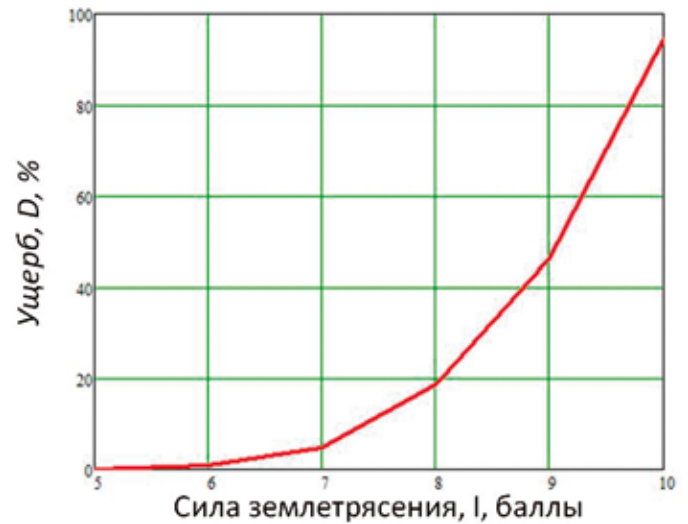


Рисунок 2 — Зависимость ожидаемого ущерба от силы воздействия  $D_{тер}^{(old)}(I)$  (% стоимости застройки)

Таблица 4 — Платежная матрица для территории, в которой имеются кирпичные, панельные и каркасные здания

$$D = \begin{pmatrix} 0.024 & 1.446 & 6.03 & 24.41 & 57.856 & 112.639 \\ 2.951 \times 10^{-3} & 0.417 & 3.931 & 16.498 & 42.251 & 88.434 \\ 0 & 0.228 & 2.762 & 8.962 & 28.957 & 62.975 \\ 0 & 0.126 & 1.498 & 5.662 & 17.443 & 47.259 \end{pmatrix}$$

$$N_{тип} = \sum_{K_s=6}^9 n_{K_s}^{(тип)} \quad (8)$$

Возможный ущерб по каждому типу зданий определяется следующей суммой

$$\sum_{K_s=6}^9 \left( \sum_{I=5}^{I_{max}} D_{тип}(K_s, I) \cdot L(I) \right) \cdot C_{тип} \cdot n_{K_s}^{(тип)} \quad (9)$$

Переходя в формуле (9) к относительному ущербу, как это сделано при выводе формулы (3) и, меняя местами суммирование по типам зданий и классам сейсмостойкости, получим оценку риска

$$R(I) = \sum_{I=5}^{I_{max}} \left( \frac{\sum_{тип=1}^N \sum_{K_s=6}^9 \left( \sum_{I=5}^{I_{max}} D_{тип}(K_s, I) \right) \cdot \alpha_{тип} \cdot \mu_{тип}}{\sum_{тип=1}^N \alpha_{тип} \cdot \mu_{тип}} \right) \cdot L(I) \quad (10)$$

Выражение в скобках в формуле (10) можно рассматривать, как функцию уязвимости для существующей территории

$$D_{тер}^{(old)}(I) = \frac{\sum_{тип=1}^N \sum_{K_s=6}^9 D_{тип}(K_s, I) \cdot \alpha_{тип} \cdot \mu_{K_s}^{(тип)}}{\sum_{тип=1}^N \alpha_{тип} \cdot \mu_{тип}} \quad (11)$$

В отличие от (6) функция уязвимости (11) одномерная и требует в 4 раза больше значений  $\mu$ , которые можно представить в виде матрицы. Например, строка  $\mu$  в (7) преобразуется в матрицу

$$\mu = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.2 & 1 \\ 0.3 & 0.1 & 0.5 \\ 0.1 & 0 & 0.3 \\ 0.1 & 0 & 0.2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Если за базовые приняты кирпичные здания, то приведенная матрица указывает, что 50% от их числа не усилены, 30% — усилены на 7 баллов, 10% — на 8 баллов и 10% — на 9 баллов.

Зависимость  $D_{тер}^{(old)}(I)$  для принятой матрицы распределения объектов по степени усиления (12) приведена на рисунке 2.

С учетом полученных выражений для функции уязвимости сохраняется формула Л.В. Канторовича для оценки риска

$$R = \sum_{I=5}^{I_{max}} D(I)_{тер}^{(old)} \cdot L(I) \quad (13)$$

В таблице 5 приведены значения рисков для рассматриваемого примера застройки.

### Заключение

Полученные в статье формулы обобщают известные результаты [1], [2], полученные для оценки сейсмического риска для отдельного сооружения, на случай оценки риска для территории. При этом сохраняется структура известных формул, но требуются специфические функции уязвимости (платежные матрицы), учитывающих состав жилого фонда на рассматриваемой территории.

### Библиография

1. Канторович Л.В., Кейлис-Борок В.И., Молчан Г.И. Сейсмический риск и прин-

Таблица 5 — Значения рисков для рассматриваемого примера застройки и разных территорий

Территория	Ситуационная сейсмичность	Риск по формуле (13), %
Усть-Камчатск	$I_A = 10; I_B = 10; I_C = 10$	2.493
Углегорск	$I_A = 9; I_B = 9; I_C = 10$	0.373
Иркутск	$I_A = 8; I_B = 9; I_C = 9$	0.109
Чита	$I_A = 6; I_B = 7; I_C = 8$	0.01

- ципы сейсмического районирования. // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. Вычисл. Сейсмология. Вып. 6. — М.: Наука. 1974. С. 3-20.
2. Кейлис-Борок В.И., Нерсесов И.А., Яглом А.М. Методы оценки экономического эффекта сейсмостойкого строительства. — М.: Изд. АН СССР. 1962. 46 с.
3. Клячко М.А. Концепции приемлемого риска и сейсмические нормы. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2004. № 1.
4. Айзенберг Я.М. Модели сейсмического риска и методологические проблемы планирования мероприятий по смягчению сейсмических бедствий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2004. № 6. С. 31-38.
5. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. — Киев: Изд. УкрНИИпроектстальконструкция. 2000. 215 с.
6. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР/Под ред. Ю.В. Ризниченко. — М.: Наука. 1979. 192 с.
7. Уздин А.М., Воробьев В.А., Богданова М.А., Сигидов В.В., Ваничева С.С. Экономика сейсмостойкого строительства. — М.: ФГПУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2017. 176 с.
8. Богданова М.Ю., Сигидов В.В., Уздин А.М., Чернов В.П. Статистические характеристики ущерба в теории риска. // Современная экономика: проблемы и решения. 2016. № 5. С. 22-30.
9. Зайнулабидова Х.Р., Уздин А.М., Чиркст Т.М. Зависимость функции распределения коммерческого ущерба при возможных землетрясениях от класса сейсмостойкости сооружения. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44. № 1. С. 162-173.
10. Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. — Санкт-Петербург: Изд. ВНИИГ. 1993. 175 с.
11. РСН-44-88 Инструкция по оценке сейсмостойкости эксплуатируемых мостов на сети железных и автомобильных дорог (на территории Туркменской ССР). — Ашхабад: Ылым. 1988. 106 с.

eng

Akbiev R.T., Bogdanova M.A., Uzdin A.M.

## ESTIMATING THE ECONOMIC SEISMIC RISK OF TERRITORIES

A generalization of the formulas of L. V. Kantorovich for estimating the seismic risk for individual structures to calculate the risk for the built-up area is proposed. Cases of newly built up territory are considered, which are characterized by one class of structure seismic resistance and a built-up area that has structures with a different seismic resistance class.

Keywords: seismic risk, built-up areas, seismic resistance class, structures, damage, earthquake

### References

1. Kantorovich L.V., Kejlis-Borok V.I., Molchan G.I. Sejsmicheskij risk i principy sejsmicheskogo rajonirovaniya. // Vychislitel'nye i statisticheskie metody interpretacii sejsmicheskikh dannyh. Vychisl. Sejsmologiya. Vyp. 6. — М.: Nauka. 1974. Pp. 3-20. (in Russian)
2. Kejlis-Borok V.I., Nersesov I.A., Yaglom A.M. Metody ocenki ehkonomicheskogo ehffekta sejsmostojkogo stroitel'stva. — М.: Изд. АН СССР. 1962. 46 p. (in Russian)
3. Klyachko M.A. Konceptii priemlegomogo riska i sejsmicheskie normy. // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2004. № 1. (in Russian)
4. Ajzenberg YA.M. Modeli sejsmicheskogo riska i metodologicheskie problemy planirovaniya meropriyatij po smyagcheniyu sejsmicheskikh bedstvij. // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2004. № 6. Pp. 31-38. (in Russian)
5. Perel'muter A.V. Izbrannye problemy na-dezhnosti i bezopasnosti stroitel'nyh konstrukcij. — Kiev: Izd. UkrNIIProektstal'konstrukcija. 2000. 215 p. (in Russian)
6. Sejsmicheskaya sotryasaemost' territorii SSSR. / Pod red. YU.V.Riznichenko. — М.: Nauka. 1979. 192 p. (in Russian)
7. Uzdin A.M., Vorobev V.A., Bogdanova M.A., Sigidov V.V., Vanicheva S.S. EHkonomika sejsmostojkogo stroitel'stva. — М.: FGPU DPO «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». 2017. 176 p. (in Russian)
8. Bogdanova M.YU., Sigidov V.V., Uzdin A.M., CHernov V.P. Statisticheskie harakteristiki ushcherba v teorii riska. // Sovremennaya ehkonomika: problemy i resheniya. 2016. № 5. Pp. 22-30. (in Russian)
9. Zajnulabidova H.R., Uzdin A.M., CHirkst T.M. Zavisimost' funkcii raspredeleniya kommercheskogo ushcherba pri vozmozhnyh zemletryasenyah ot klassa sejsmostojkosti sooruzheniya. // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2017. T. 44. № 1. Pp.162-173. (in Russian)
10. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Al'-Naser-Mohomad Samih Amin. Osnovy teorii sejsmostojkosti i sejsmostojkogo stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij. — Sankt-Peterburg: Izd. VNIIG. 1993. 175 p. (in Russian)
11. RSN-44-88 Instrukciya po ocenke sejsmostojkosti ehkspluatiruemyh mostov na seti zheleznyh i avtomobil'nyh dorog (na territorii Turkmenskoy SSR). — Ashkhabad: Ylym. 1988. 106 p. (in Russian)