УДК 624.04:[624.042.7+699.841]

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-101-107

© Ю. Л. Рутман, д-р техн. наук, профессор

© Yu. L. Rutman, Dr. Sci. Tech., Professor

© А. Ю. Иванов, аспирант

© A. Yu. Ivanov, post-graduate student

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: 605fractal@mail.ru, andreyivanov4@gmail.com

E-mail: 605fractal@mail.ru, andreyivanov4@gmail.com

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЧИСЛА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПЛОЩАДКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗА ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ЗДАНИЯ

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE NUMBER OF EARTHQUAKES AT THE CONSTRUCTION SITE DURING THE LIFE CYCLE OF THE BUILDING

Предложена методика вероятностной финансовой оценки сейсмического ущерба на основе его моделирования как случайного события в пуассоновском процессе. Для прогнозирования появления различных сейсмических событий в течение жизненного цикла сооружения используется формула, характеризующая протекание пуассоновского процесса на конечном интервале времени. После установления с заданной доверительной вероятностью различных комбинаций сейсмических событий проводится статистическая обработка соответствующих этим комбинациям затрат на ликвидацию ущерба. Полученные результаты могут быть использованы для выбора варианта антисейсмического усиления сооружения.

Ключевые слова: жизненный цикл здания, площадка строительства, сейсмичность, вероятностная модель, ущерб.

The paper offers a method of seismic damage assessment based on modeling seismic damage as a random event. In order to forecast various seismic events during the building life cycle of a structure, the authors use a formula characterizing the behavior of the Poisson process in the final time interval. After establishing with the predetermined confidence probability of different combinations of seismic events, the statistical treatment of the losses corresponding to these combinations of damage recovery costs is carried out. The results obtained can be used for choosing the seismic retrofit strategy of the building.

Keywords: life cycle of the building, construction site, seismic rating, probability model, damage.

Введение

Проблема выбора вариантов сейсмоусиления зданий на основе экономического критерия оптимальности широко обсуждается в литературе [1–5].

Авторами в [6] была предложена методика оптимального выбора антисейсмических мероприятий, исходя из указанного критерия. Методика развивает идеи и подходы, изложенные в [1–3, 7]. В ней учитывается, что любое здание, строящееся в сейсмически опасном районе, может подвергнуться некоторому числу сейсмических воздействий за его жизненный цикл. При каждом воздействии здание получает некоторый ущерб, устранение которого требует финансовых затрат. Эти факторы и были учтены в [6] при

выборе проектных антисейсмических мероприятий. Недостатком методики [6] было то обстоятельство, что количество воздействий n в устанавливаемом при проектировании сроке службы (жизненном цикле) здания определялось по формуле

$$n = L(I)N, \quad (1)$$

где N — жизненный цикл здания (в годах); $L(I)$ — среднегодовое количество воздействий с интенсивностью I .

Величина $L(I)$ очень мала. Поэтому полученные по вышеуказанной формуле значения n в разы меньше единицы. То есть формула (1) лишена физического смысла. Это обстоятельство затрудняет принятие решений по выбору варианта сейсмоусиления.

Целью данной статьи является осмысление результатов [6] на основе рассмотрения землетрясения как случайного события в пуассоновском процессе. Такой подход дает возможность статистически обоснованно спрогнозировать конкретное число воздействий разной силы на здание за установленный для него жизненный цикл. В результате финансовая оценка сейсмического ущерба получает ясную вероятностную интерпретацию.

1. Определение числа землетрясений за жизненный цикл здания и их вероятность

Рассмотрим вероятность появления сейсмических воздействий и их повторность в течение жизненного цикла рассматриваемого сооружения. Здесь необходимо отметить, что землетрясения могут вести за собой афтершоки — повторные толчки, происходящие после основного и меньшие по сравнению с ним. Более того, как показывают события, произошедшие в Исландии в июне 2020 года, возможен рой землетрясений — сотни толчков, происходящих в течение нескольких суток, ощущаемые на относительно небольшой территории (в пределах одного населенного пункта). Таким образом, под повторяемостью землетрясений интенсивностью I будем понимать интервал между тектоническими событиями, как происходящими в короткий промежуток времени (в пределах одной минуты), так и представляющими собой серию толчков, длящихся в течение длительного времени (до нескольких суток).

При этом будем рассматривать землетрясения интенсивностью I в некотором районе как поток случайных событий, землетрясения разной интенсивности как независимые потоки случайных событий. Интервал между землетрясениями заданной интенсивности является случайной величиной, подчиняющейся пуассоновскому распределению.

Если принять, что события (землетрясения разной балльности) статистически независимы, то реализация событий внутри одной группы не зависит от реализации событий внутри других групп.

В рамках решаемой задачи оптимизации необходимо оперировать таким понятием, как вероятность реализации некоторого числа землетрясений определенной балльности за жиз-

ненный цикл. Для их определения может быть применена формула, приведенная в [8] и характеризующая протекание пуассоновского процесса на некотором интервале времени,

$$\omega_I(\tau_0) = \frac{e^{-\lambda_I \tau_0} (\lambda_I \tau_0)^{k_I}}{k_I!}. \quad (2)$$

Здесь τ_0 — жизненный цикл здания; k_I — число землетрясений I -й балльности за жизненный цикл здания; $\lambda_I = \frac{1}{T_I}$, где T_I — среднее значение интервала времени между землетрясениями (период повторяемости) интенсивностью I баллов. Эта формула уже применялась для описания потока событий в виде череды землетрясений А. М. Масленниковым в [9] со ссылкой на [10].

Итак, вероятность того, что в интервале τ_0 произойдет k_1 землетрясений интенсивностью I_1 и k_2 землетрясений интенсивностью I_2 , равна

$$\omega_{12} = \frac{e^{-\lambda_{I_1} \tau_0} (\lambda_{I_1} \tau_0)^{k_1}}{k_1!} \frac{e^{-\lambda_{I_2} \tau_0} (\lambda_{I_2} \tau_0)^{k_2}}{k_2!}. \quad (3)$$

Если рассматривать три вида интенсивностей: 7, 8 и 9 баллов, которым присвоить индексы 1, 2 и 3, то формула (2) превратится в формулу

$$\omega_{123} = \frac{e^{-\lambda_{I_1} \tau_0} (\lambda_{I_1} \tau_0)^{k_1}}{k_1!} \frac{e^{-\lambda_{I_2} \tau_0} (\lambda_{I_2} \tau_0)^{k_2}}{k_2!} \times \frac{e^{-\lambda_{I_3} \tau_0} (\lambda_{I_3} \tau_0)^{k_3}}{k_3!}. \quad (4)$$

В дальнейшем будем рассматривать поле событий, в котором k_1, k_2, k_3 пробегает значения от 0 до l_1, l_2, l_3 . Этому полю событий соответствует вероятность

$$\sum \omega_{k_1, k_2, k_3} = \sum_{k_1=0, k_2=0, k_3=0}^{k_1=l_1, k_2=l_2, k_3=l_3} \frac{e^{-\lambda_{I_1} \tau_0} (\lambda_{I_1} \tau_0)^{k_1}}{k_1!} \times \frac{e^{-\lambda_{I_2} \tau_0} (\lambda_{I_2} \tau_0)^{k_2}}{k_2!} \cdot \frac{e^{-\lambda_{I_3} \tau_0} (\lambda_{I_3} \tau_0)^{k_3}}{k_3!}. \quad (5)$$

Формулу (5) можно применить для прогнозирования сейсмичности на площадке строительства в течение жизненного цикла здания. Для определения возможного числа землетрясений в течение жизненного цикла здания и установления вероятности сейсмических событий предлагается следующая последовательность действий:

1. Задаются числа l_1, l_2, l_3 и вычисляется ряд по формуле (5):

$$\Omega_{123} = \sum_{k_1, k_2, k_3} \omega_{k_1, k_2, k_3}.$$

Вероятность Ω_{123} — это вероятность землетрясений с интенсивностью 9, 8 и 7 баллов, количество которых за жизненный цикл не превосходит l_1, l_2, l_3 соответственно. Таким образом, Ω_{123} является доверительной вероятностью, соответствующей трехмерному интервалу событий (землетрясений), определяемому параметрами l_1, l_2, l_3 .

Если эта доверительная вероятность приемлема, то создается табл. 1, описывающая содержание трехмерного доверительного интервала. В противном случае за счет параметров l_1, l_2, l_3 увеличивается или уменьшается число слагаемых в (5).

В табл. 1 столбец 1 — номер слагаемого в сумме (5), столбец 2 — значения этих слагаемых, т. е. вероятность комбинации сейсмических событий, соответствующих параметрам k_1, k_2, k_3 . В столбце 3 указаны все возможные комбинации, соответствующие принятой доверительной вероятности. Физически они представляют собой различные сочетания числа событий внутри каждой группы. Для каждой строки табл. 1 рассчитывается экономический ущерб, соответствующий конкретному варианту сейсмических событий (столбец 4). Этот ущерб является дискретной случайной величиной. Вероятность появления этого ущерба равна k_1, k_2, k_3 . Поэтому

Таблица 1

Расчет вариантов ущерба от возможных землетрясений

Номер слагаемого	Вероятность комбинации сейсмических событий, соответствующих параметрам k_1, k_2, k_3	Количество землетрясений разной силы k_1, k_2, k_3	Ущерб от соответствующей комбинации землетрясений D_{k_1, k_2, k_3}
1	2	3	4
1	0,33926797	$k_1 = 0; k_2 = 0; k_3 = 0$	0
2	0,264451234	$k_1 = 0; k_2 = 0; k_3 = 1$	0,026445
3	0,102965607	$k_1 = 0; k_2 = 0; k_3 = 2$	0,041186
4	0,026667351	$k_1 = 0; k_2 = 0; k_3 = 3$	0,024001
5	0,067837018	$k_1 = 0; k_2 = 1; k_3 = 0$	0,036157
6	0,052877326	$k_1 = 0; k_2 = 1; k_3 = 1$	0,033471
7	0,020588091	$k_1 = 0; k_2 = 1; k_3 = 2$	0,019209
8	0,005332167	$k_1 = 0; k_2 = 1; k_3 = 3$	0,119652
9	0,006754694	$k_1 = 0; k_2 = 2; k_3 = 0$	0,014401
10	0,005265122	$k_1 = 0; k_2 = 2; k_3 = 1$	0,011752
11	0,002050005	$k_1 = 0; k_2 = 2; k_3 = 2$	0,005191
12	0,000530937	$k_1 = 0; k_2 = 2; k_3 = 3$	0,00161
13	0,033926797	$k_1 = 1; k_2 = 0; k_3 = 0$	0,033927
14	0,026445123	$k_1 = 1; k_2 = 0; k_3 = 1$	0,02909
15	0,010296561	$k_1 = 1; k_2 = 0; k_3 = 2$	0,014415
16	0,002666735	$k_1 = 1; k_2 = 0; k_3 = 3$	0,005067
17	0,006783702	$k_1 = 1; k_2 = 1; k_3 = 0$	0,010399
18	0,005287733	$k_1 = 1; k_2 = 1; k_3 = 1$	0,008635
19	0,002058809	$k_1 = 1; k_2 = 1; k_3 = 2$	0,00398
20	0,000533217	$k_1 = 1; k_2 = 1; k_3 = 3$	0,001297
21	0,000675469	$k_1 = 1; k_2 = 2; k_3 = 0$	0,125232
22	0,000526512	$k_1 = 1; k_2 = 2; k_3 = 1$	0,001702
23	0,000205001	$k_1 = 1; k_2 = 2; k_3 = 2$	0,180832
24	5,30937E-05	$k_1 = 1; k_2 = 2; k_3 = 3$	0,000214
Сумма ω	0,984046275	Суммарный ущерб	0,747863

му оценка математического ожидания общего ущерба для всех вариантов сейсмических событий, ограниченных параметрами l_1, l_2, l_3 , равна

$$D = \sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3} \omega_{k_1, k_2, k_3}. \quad (6)$$

Формула (6) и табл. 1 позволяют придать статистический смысл формулам методики [6] и развить методологию выбора варианта сейсмоусиления.

2. Выбор варианта сейсмоусиления на основе табл. 1

1. Рассмотрим определение финансового ущерба с помощью формулы (6) и табл. 1.

Каждой строке табл. 1 соответствует финансовый ущерб

$$D_{k_1, k_2, k_3} = D(I_1)k_1 + D(I_2)k_2 + D(I_3)k_3, \quad (7)$$

где $D(I_1), D(I_2), D(I_3)$ — финансовый ущерб при воздействии 9, 8, 7-балльных землетрясений. Финансовые параметры $D(I_1), D(I_2), D(I_3)$ определяются по методологии, изложенной в [6, 12, 13].

Величины $D(I_1), D(I_2), D(I_3)$ надо привести к моменту появления сейсмического события, т. е. учесть полученную прибыль и снижение стоимости сооружения [1]. При предлагаемом в статье подходе можно скорректировать ущерб (7), умножив D_{k_1, k_2, k_3} на усредненное значение коэффициента приведения

$$f_{cp}(k, N) = \frac{f(k, N)}{N}. \quad (8)$$

Тогда затраты на восстановление сооружения (на ликвидацию ущерба) равны

$$\begin{aligned} \bar{D} &= f_{cp}(k, N) D = \\ &= f_{cp}(k, N) \sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3} \omega_{k_1, k_2, k_3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, минимизируемый критерий имеет вид

$$\bar{E} = -K_{ant} - f_{cp}(k, N) \sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3} \omega_{k_1, k_2, k_3}. \quad (10)$$

Критерий (10) имеет ясный статистический смысл. Поэтому можно указать стратегию, в которой применим этот критерий оптимизации. Оптимизацию по критерию (10) можно проводить, если речь идет о массовой застройке однотипных зданий в различных сейсмоопасных районах.

Сравним подход, предлагаемый в [6], с результатами, которые могут быть получены по формуле (10).

Основная формулировка оптимизационного алгоритма, выведенная в [6], задается формулой

$$E = -K_{ant} - f(k, N) \sum_{I=I_{\min}}^{I=I_{\max}} L(I) D_{rel}(I), \quad (11)$$

где K_{ant} — затраты на антисейсмические мероприятия, которые необходимо выделить из общей суммы капиталовложений в строительство объекта для повышения его сейсмостойкости (определяется расчетом сметной стоимости); $f(k, N)$ — коэффициент приведения затрат к моменту землетрясения (здесь $k = \frac{d+d^*}{1+d}$, где d^* — норма амортизации (параметр, определяющий снижение стоимости здания во времени и обратный его сроку эксплуатации), d — годовая прибыль производства); $D_{rel}(I)$ — наступивший в результате одного I -балльного землетрясения ущерб; $L(I)$ — среднегодовое число I -балльных землетрясений на площадке строительства, определяемое по формуле $L(I) = \frac{n}{N}$, где n — число землетрясений силой I (выраженной в баллах) за устанавливаемый жизненный цикл здания N .

Оптимизация заключается в минимизации величины затрат E . Оба слагаемых в правой части (11) — это затраты. Но увеличивая первое слагаемое, мы уменьшаем второе. Поэтому суть оптимизации в том, чтобы найти наилучшее соотношение между антисейсмическими затратами и возможным ущербом.

Сравним (10) и (11). Не умаляя общности и для большей наглядности, примем $k_2 = 0, k_3 = 0$, а сравнивать надо только вторые слагаемые в (10) и (11). Используя (7) и (8), получаем

$$f(k, N) L(I) D_{rel}(I) = f_{cp}(k, N) N L(I_1) D(I_1); \quad (12)$$

$$f_{cp}(k, N) \sum_{k_1} D_{k_1} \omega_{k_1} = f_{cp}(k, N) \sum_{k_1} D(I_1) k_1 \omega_{k_1}. \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) и соответственно (10) и (11) отличаются множителями $N L(I_1) D(I_1)$ и $\sum_{k_1} D(I_1) k_1 \omega_{k_1}$. Величина $\sum_{k_1} D(I_1) k_1 \omega_{k_1}$ является оценкой математического ожидания числа 7-балльных землетрясений в течение жизненного цикла сооружения. Тот же смысл имеет величина $N L(I_1) D(I_1)$. Однако последний параметр дает эту оценку менее точно, если исходить из гипотезы пуассоновского потока событий. Поэтому следует предпочесть формулу (13). Физический смысл (10) и (11) одинаков. Иначе говоря,

предлагаемый выше подход к выбору варианта сейсмоусиления является модернизацией методики [6].

3. Альтернативный подход к оценке ущерба

Сравнение вариантов сейсмоусиления можно проводить, исходя из наихудшей с экономической точки зрения и статистически значимой, но не усредненной финансовой оценки ущерба. В этом случае устанавливается минимально значимая величина вероятности. В табл. 1 события, вероятности которых оказываются ниже этой границы, отбрасываются. Затем из оставшихся событий выбираются те, которые приводят к наибольшему ущербу. Таким событиям, как правило, отвечают последние строки табл. 1, так как им соответствует максимальное число землетрясений. В результате такого отбора оптимизация проводится по критерию

$$\tilde{D} = f_{cp}(k, N)D = f_{cp}(k, N) \sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3}, \quad (14)$$

где k_1, k_2, k_3 соответствуют статистически значимому (по установленной величине статистического минимума) и наихудшему с экономической точки зрения варианту. Физический смысл (14), как и физический смысл (10), также ясен. В критерии (14) отсутствует усреднение («размазывание») затрат. Поэтому оптимизацию по критерию (14) следует проводить, если речь идет о строительстве уникального здания или сооружения в сейсмоопасном районе.

4. Численный анализ

1. На примере некоторого проектируемого в сейсмически опасном районе типового здания рассматривается применение различных подходов для расчета экономического эффекта. Пусть определены антисейсмические мероприятия для этого здания и проведена серия расчетов, в результате чего определен финансовый ущерб, который образуется при восстановлении здания после каждого из возможных землетрясений. Для того чтобы определить число землетрясений за жизненный цикл здания и решить оптимизационную задачу с использованием формулы (10), сначала вычисляются вероятности всех независимых событий по формуле (2). Если принять, например, что площадка строительства располагается в районе с повторяемостью:

- 9-балльных землетрясений 1 раз/1000 лет;
- 8-балльных землетрясений 1 раз/500 лет;

- 7-балльных землетрясений 1 раз/128 лет, принятой по картам В. И. Уломова [11] (что соответствует Южно-Сахалинску), то серия расчетов по формуле (2) дает значения вероятностей ω , необходимых для дальнейших вычислений. В табл. 1 также представлены данные о финансовом ущербе, полученные для данного здания по методике, предложенной ранее в работах [6, 12, 13]. Ущерб, как другие стоимостные характеристики, задается в относительных величинах, за единицу принимается полная стоимость здания. Проектируемый срок службы здания (жизненный цикл) принимается равным 100 годам. Значения $L(I)$ для соответствующих интенсивностей в рассматриваемом районе равны:

- $1/1000 = 0,001$ — для 9-балльных воздействий;
- $1/500 = 0,002$ — для 8-балльных воздействий;
- $1/128 = 0,00781$ — для 7-балльных воздействий.

Пусть затраты на антисейсмические мероприятия K_{ant} составляют 0,02, годовая прибыль от эксплуатации здания составляет $d = 0,1$, а амортизация $d^* = 0,03$.

Рассматриваем ситуацию, когда 9-балльных землетрясений на данной площадке за назначенный срок службы, равный 100 годам, не может произойти более одного, 8-балльных — не более двух, а 7-балльных — не более трех, т. е. $l_1 = 2, l_2 = 3, l_3 = 4$. Далее заставляем k_1, k_2, k_3 пробегать эти значения, что отражено в третьем столбце табл. 1. Доверительная вероятность, соответствующая этому трехмерному варианту, равна 0,98. Если допускаются более низкие значения доверительной вероятности, то число слагаемых внутри каждой группы l_1, l_2, l_3 может быть уменьшено. Фактически это будет означать, что за тот же временной интервал, равный 100 годам, предполагается меньшее количество землетрясений разной интенсивности. Так или иначе, в вопросе назначения доверительной вероятности последнее слово остается за заказчиком, так как риски, связанные с возникновением непредвиденного сейсмического ущерба, входят в его зону ответственности.

Решение оптимизационной задачи по используемой в предыдущих работах формуле (11) с указанными исходными данными дает значение

экономического эффекта E в конце жизненного цикла, равное $-0,04$. Выполняя расчет по предлагаемой в данной статье формуле (10) с этими же исходными данными, а также данными из табл. 1, получаем экономический эффект $\bar{E} = -0,045$. Результаты отличаются друг от друга на 11 %.

2. Рассмотрим теперь случай определения ущерба по наихудшим статистически значимым событиям для уникальных сооружений, т. е. когда ущерб не усредняется, а главный интерес представляют те события, которые приводят к его наибольшему размеру. Для расчета воспользуемся теми же исходными данными.

Сейсмический ущерб в этом случае вычисляется по формуле (14), где для расчета $\sum_{k_1, k_2, k_3} D_{k_1, k_2, k_3}$ используется комбинация $k_1 = 1; k_2 = 2; k_3 = 3$, так как ей соответствует максимальное число землетрясений внутри каждой группы. Физически это означает, что на заданной площадке строительства за жизненный цикл здания возможны одно 9-балльное, два 8-балльных и три 7-балльных землетрясения. Для расчета по формуле (14) требуются данные об ущербе, причиняемые рассматриваемому зданию землетрясениями разной силы. Такие данные приведены в табл. 2.

Подставляя данные табл. 2 в формулу (14) и принимая во внимание влияние коэффициента $f_{cp}(k, N)$, получаем значение возможного ущерба к концу жизненного цикла здания, равного 100 годам, $\bar{D} = 0,18$.

Таблица 2
Ущерб, причиняемый рассматриваемому зданию землетрясениями разной силы

Сила землетрясения	Кол-во землетрясений	Ущерб (в относительных единицах) от одного землетрясения
7 баллов	3	0,1
8 баллов	2	0,533
9 баллов	1	1

Заключение

Выполнено развитие предложенной ранее методологии экономической оптимизации сейсмостойких конструктивных решений. Дано статистическое обоснование предложенной ранее

методики оптимизации на основе рассмотрения землетрясений как событий пуассоновского процесса. Показано, что такая методология должна применяться к массовому строительству. Предложен также новый критерий и алгоритм вычисления экономического эффекта, позволяющий осуществлять экономическую оптимизацию для уникальных зданий и сооружений.

Библиографический список

1. Уздин А. М., Елизаров С. В., Белаиш Т. А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 501 с.
2. Уздин А. М., Воробьев В. Г., Богданова М. А. и др. Экономика сейсмостойкого строительства / под ред. А. М. Уздина. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. 176 с.
3. Bogdanova M. A., Sakharov O. A., Sigidov V. V., Uzdin A. M. The influence of seismic isolation on the value of seismic risk and investment efficiency // 11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Guangzhou, China, Nov. 17-21, 2009.
4. Wen Y. K., Kang Y. J. Minimum building life-cycle cost design criteria. I: Methodology // Journal of Structural Engineering. 2001. Vol. 127 (3). Pp. 330–337.
5. Wen Y. K., Kang Y. J. Minimum building life-cycle cost design criteria. II: Applications // Journal of Structural Engineering. 2001. Vol. 127 (3). Pp. 338–346.
6. Ватин Н. И., Иванов А. Ю., Рутман Ю. Л., Черногорский С. А. Оптимизация конструкций сейсмостойких сооружений по экономическому критерию // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 8 (76). С. 77–93.
7. Кейлис-Борок В. И., Нерсесов И. А., Яглом А. М. Методы оценки экономического эффекта сейсмостойкого строительства. М.: АН СССР, 1962. 46 с.
8. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969. 512 с.
9. Масленников А. М. Риски возникновения природных и техногенных катастроф. СПб.: СПбГАСУ, 2008. 163 с.
10. Котляревский В. А., Кочетков К. Е., Носач А. А., Забегаев А. В. и др. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: в 3 кн. / под ред. К. Е. Кочеткова, В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. М.: АСВ, 1995. 320 с.
11. Уломов В. И., Богданов М. И. Новый комплект карт общего сейсмического районирования террито-

рии Российской Федерации (ОСР-2012) // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 30–39.

12. Иванов А. Ю., Черногорский С. А., Власов М. П. Оптимизация конструктивных решений сейсмостойкого проектирования по экономическому критерию с учетом применения системы сейсмоизоляции // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4 (80). С. 138–150.

13. Иванов А. Ю. Оптимизация проектов сейсмоизолированных сооружений // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 36–45.

References

1. Uzdin A. M., Elizarov S. V., Belash T. A. *Seysmostoykie konstruksii transportnykh zdaniy i sooruzheniy* [Earthquake resistant design of transport buildings and structures]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2012, 501 p.
2. Uzdin A. M., et al. *Ekonomika seysmostoykogo stroitel'stva* [Economics of earthquake-resistant construction]. Ed. by Uzdin A. M. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2017, 176 p.
3. Bogdanova M. A., Sakharov O. A., Sigidov V. V., Uzdin A. M. *The influence of seismic isolation on the value of seismic risk and investment efficiency*. Proc. of the 11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Guangzhou, China, November 17–21, 2009.
4. Wen Y. K., Kang Y. J. Minimum building life-cycle cost design criteria. I: Methodology. *Journal of Structural Engineering*, 2001, vol. 127 (3), pp. 330–337.
5. Wen Y. K., Kang Y. J. Minimum building life-cycle cost design criteria. II: Applications. *Journal of Structural Engineering*, 2001, vol. 127 (3), pp. 338–346.
6. Vatin N. I., Ivanov A. Yu., Rutman Yu. L., Chernogorskiy S. A. *Optimizatsiya konstruksiy seysmostoykikh sooruzheniy po ekonomicheskomu kriteriyu* [Optimizing the design of earthquake-resistant structures by economic criterion]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering and construction journal*, 2017, no. 8 (76), pp. 77–93.
7. Keylis-Borok V. I., Nersesov I. A., Yaglom A. M. *Metody otsenki ekonomicheskogo effekta seysmostoykogo stroitel'stva* [Methods for assessing the economic effect of earthquake-resistant construction]. Moscow, AN SSSR Publ., 1962, 46 p.
8. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskiy I. V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki* [Course of probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 512 p.
9. Maslennikov A. M. *Riski vozniknoveniya prirodnykh i tekhnogennykh katastrof* [Risks of natural and man-made disasters]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2008, 163 p.
10. Kotlyarevskiy V. A., et al. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy* [Accidents and catastrophes. Prevention and elimination of consequences]. In 3 Books. Ed. by Kochetkov K. E., Kotlyarevskiy V. A., Zabegaev A. V. Moscow, ASV Publ., 1995, 320 p.
11. Ulomov V. I., Bogdanov M. I. *Noviy komplekt kart obshchego seysmicheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii (OSR-2012)* [A new set of maps of General seismic zoning of the territory of the Russian Federation (OSR-2012)]. *Inzhenernye izyskaniya – Engineering survey*, 2013, no. 8, pp. 30–39.
12. Ivanov A. Yu., Chernogorskiy S. A., Vlasov M. P. *Optimizatsiya konstruktivnykh resheniy seysmostoykogo proektirovaniya po ekonomicheskomu kriteriyu s uchetom primeneniya sistemy seysmoizolyatsii* [Optimization of structural solutions for earthquake-resistant design according to the economic criterion, taking into account the use of a seismic isolation system]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Civil engineering journal*, 2018, no. 4 (80), pp. 138–150.
13. Ivanov A. Yu. *Optimizatsiya proektov seysmoizolirovannykh sooruzheniy* [Optimization of projects of seismically isolated structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 4 (69), pp. 36–45.