

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ И УЧЕТА СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА
ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ**

Дмитрий Владимирович Стефанишин

*Ведущий научный сотрудник Института телекоммуникаций и глобального
информационного пространства Национальной академии наук Украины,
доктор технических наук*

По разрушительным последствиям, количеству жертв, материальным ущербам и деструктивному действию на среду обитания человека землетрясения занимают одно из первых мест среди опасных природных и природно-техногенных явлений [1], определяют условия жизнедеятельности населения и инженерной деятельности на значительной территории земного шара.

Сейсмическая опасность актуальна практически для всей без исключения территории России, где даже на относительно спокойных в геологическом отношении равнинных территориях имели место, и не исключаются в будущем, достаточно сильные и разрушительные землетрясения. При этом значительную площадь страны занимают чрезвычайно опасные в сейсмическом отношении 8-9- и 9-10-балльные зоны [2]. Сильные землетрясения угрожают странам Закавказья, среднеазиатским странам, Казахстану, в том числе и густонаселенным территориям этих стран [3]. Весьма актуальной сейсмическая опасность является и для Украины, где сейсмоопасные районы с прогнозируемой интенсивностью сейсмических сотрясений от 6 до 9 баллов за шкалой MSK-64 занимают около 20% территории (почти 120000 км²), на которой проживает свыше 10 млн. населения, а районы с интенсивностью 7-9 баллов за шкалой MSK-64 – около 12% территории, где проживает свыше 7 млн. людей.

В тоже время, как свидетельствует опыт развитых стран, никакой фатальной неизбежности ущербов и потерь от землетрясений нет. Как сказано в книге видных американских специалистов по сейсмостойкому проектированию и строительству Дж. Гира и Х. Шаха «не землетрясения убивают людей, а здания» [4]. И поскольку угрозы от землетрясений реализуются в соответствии со стохастическими законами, то это означает, что ущербам и потерями от землетрясений можно управлять – путем минимизации сейсмического риска. Однако такая возможность может быть реализована только в случае адекватной оценки сейсмического риска в контексте принятия решений.

Концептуальные основы для оценки сейсмического риска и его учета при принятии решений были заложены еще во второй половине XIX века при внедрении первых сейсмических шкал. Кроме оценки сейс-

мической опасности в зависимости от интенсивности колебаний на поверхности Земли, критериями, на которых базируются современные сейсмические шкалы, являются внешние проявления (последствия) землетрясений. Последние связываются с ущербами и вредом – характером разрушения сооружений, остаточными деформациями грунтов и т.п., а также – с частотой (количеством землетрясений определенной интенсивности в баллах за год) [5].

Как известно, в России и в странах бывшего СССР используется 12-балльная сейсмическая шкала MSK-64 [6]. В качестве основной расчетной характеристики, характеризующей уровень сейсмической опасности, используется максимальное сейсмическое ускорение a_{\max} колебаний частиц грунта на поверхности земли. Между сейсмической интенсивностью I в баллах шкалы MSK-64 и максимальным ускорением a_{\max} устанавливается сложная вероятностная зависимость (рис. 1).

На рис. 1 видно, что одним и тем же ускорениям a_{\max} могут отвечать разные интегральные вероятности $P(a_{\max})$ при разной интенсивности I сейсмических колебаний, в баллах, и, соответственно, при разной их частоте. То есть одни и те же максимальные сейсмические ускорения a_{\max} с разной вероятностью могут прогнозироваться в значительном диапазоне изменения интенсивности сейсмических колебаний, в баллах.

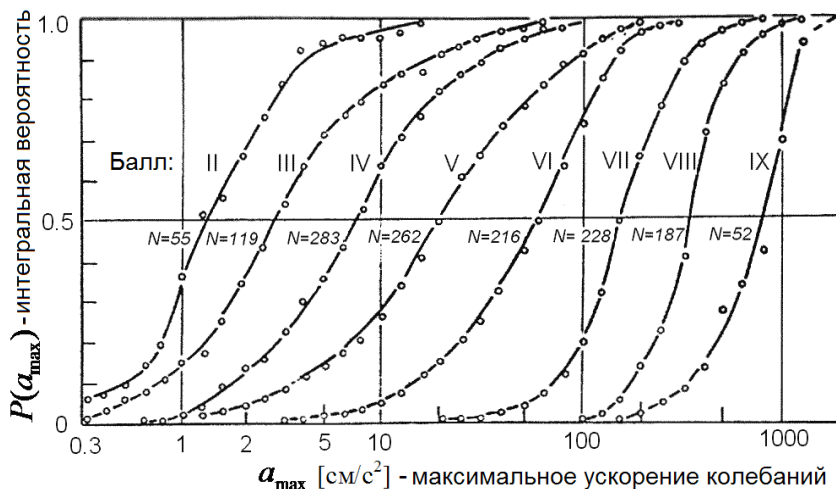


Рис. 1. Характер вероятностной связи между I , в баллах шкалы MSK-64, и a_{\max} ;

N – количество сейсмограмм землетрясений, использованных для построения графиков, характеризующих разную интенсивность

Положим, что при некотором расчетном землетрясении интенсивностью I_p , в баллах, сооружение способно безотказно (не разрушаясь и не повреждаясь) выдержать некоторое расчетное максимальное сейсмическое ускорение $a_{\max,p}$. Тогда вероятность $P(a_{\max,p})$, определенная при I_p как условная вероятность $P(a_{\max,p} | I_p)$ непревышения соответствующего ускорения, может характеризовать минимально допустимое значение (оценку inf) условной вероятности безотказной работы (надежности) этого объекта $P(V | I_p)$ при интенсивности I_p :

$$\inf P(V | I_p) = P(a_{\max,p} | I_p). \quad (1)$$

В свою очередь дополнение вероятности $P(a_{\max,p} | I_p)$ до единицы, как вероятность превышения $a_{\max,p}$, будет характеризовать максимально допустимое значение (оценку sup) условной вероятности отказа $P(Q | I_p)$ сооружения при I_p :

$$\sup P(Q | I_p) = P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_p) = 1 - P(a_{\max,p} | I_p), \quad (2)$$

где $P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_p)$ – вероятность превышения $a_{\max,p}$ при землетрясении интенсивностью I_p .

Другой важной характеристикой сейсмической опасности, определяющей безусловную вероятность отказа от расчетного землетрясения интенсивностью I_p , является средний период его повторения $T(I_p)$. В зависимости от периода повторения $T(I_p)$ устанавливается ежегодная вероятность $p(I_p)$ превышения землетрясения интенсивностью I_p :

$$p(I_p) = 1/T(I_p). \quad (3)$$

Воспользовавшись формулой произведения вероятностей (полной вероятности), получим максимально допустимое значение (оценку sup) безусловной вероятности (риска) отказа сооружения $P(Q, I_p)$ при расчетном землетрясении интенсивностью I_p :

$$\sup P(Q, I_p) = \frac{1}{T(I_p)} [1 - P(a_{\max,p} | I_p)] = P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_p) \cdot p(I_p) \quad (4)$$

Следует также учесть, что одни и те же ускорения a_{\max} , хотя и с разной вероятностью $P(a_{\max})$ (см. рис. 1), включая ускорения $a_{\max,p}$, могут превышать и при землетрясениях, интенсивность которых меньше расчетной I_p .

Рассмотрим некоторую группу I потенциально возможных k -х землетрясений $I = \{I_k\}, k = \overline{m, p}$, в которой землетрясение с интенсивностью сотрясений I_m представляет собой некоторое минимальное по ин-

тенсивности, в баллах, землетрясение из возможных на площадке сейсмических событий с максимальными ускорениями $a_{\max} \geq a_{\max,p}$, а землетрясение интенсивностью I_p является максимальным расчетным землетрясением на площадке, в баллах, на которое рассчитывается сооружение при $a_{\max,p}$.

В этом случае для оценки максимально допустимого значения полной вероятности отказа сооружения $P(Q, I)$ с учетом возможности любого из k -х землетрясений $I = \{I_k\}$, $k = \overline{m, p}$, можно воспользоваться формулой полной вероятности в виде:

$$\sup P(Q, I) = \sum_{k=m}^p P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_k) \cdot P(I_k), \quad (5)$$

где, с учетом формирования полной группы событий, вероятности:

$$P(I_k) = p(I_k) - p(I_{k+1}), \quad (6)$$

$p(I_k)$, $p(I_{k+1})$ – ежегодные вероятности превышения землетрясений интенсивностями I_k, I_{k+1} :

$$p(I_k) = 1/T(I_k), \quad p(I_{k+1}) = 1/T(I_{k+1}), \quad (7)$$

$T(I_k)$, $T(I_{k+1})$ – средние периоды повторения землетрясений интенсивностями I_k, I_{k+1} .

При максимальном расчетном землетрясении интенсивностью $I_p (k=p)$ вероятность $P(I_p) = p(I_p)$. Условие формирования полной группы событий на $I = \{I_k\}$, $k = \overline{m, p}$:

$$\sum_{k=m}^p P(I_k) = p(I_m). \quad (8)$$

Пример. Сооружение рассчитано на максимальное сейсмическое ускорение $0,1 \cdot g$ ($\sim 100 \text{ см/с}^2$), где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. Площадка, на которой размещается сооружение, относится к зоне, где возможны сотрясения интенсивностью 7 баллов по шкале MSK-64 для средних грунтов. Пусть, максимальное расчетное землетрясение с интенсивностью сейсмических колебаний 7 баллов ожидается 1 раз в 5000 лет; с интенсивностью сейсмических колебаний 6 баллов – 1 раз в 1000 лет; с интенсивностью сейсмических колебаний 5 баллов – 1 раз в 500 лет; землетрясение с интенсивностью сейсмических колебаний 4 балла – 1 раз в 200 лет.

Согласно данным, представленным на рис.1, имеем вероятности превышения максимального сейсмического ускорения $a_{\max,p} = 0,1 \cdot g$ при землетрясениях интенсивностью $k = 7, 6, 5$ и 4 балла:

$$P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_7) = 0,80;$$

$$P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_6) = 0,25;$$

$$P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_5) = 0,10;$$

$$P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_4) = 0,01.$$

С учетом (3), (6)÷(8) имеем вероятности $P(I_k)$: $P(I_7) = 2 \cdot 10^{-4}$, год⁻¹; $P(I_6) = 8 \cdot 10^{-4}$, год⁻¹; $P(I_5) = 10^{-3}$, год⁻¹; $P(I_4) = 3 \cdot 10^{-3}$, год⁻¹.

Используя формулу (5), получаем максимально допустимое значение полной вероятности отказа сооружения $P(Q, I)$ при землетрясении с учетом возможности любого из землетрясений интенсивностью $k = 7, 6, 5$ и 4 балла: $\sup P(Q, I_{7,6,5,4}) = 4,9 \cdot 10^{-4}$, год⁻¹.

Отметим, что максимально допустимое значение полной вероятности отказа сооружения $P(Q, I)$ при землетрясении с учетом возможности любого из землетрясений интенсивностью $k = 7, 6, 5$ и 4 балла, $\sup P(Q, I_{7,6,5,4}) = 4,9 \cdot 10^{-4}$, год⁻¹, больше максимально допустимого значения безусловной (полной) вероятности отказа сооружения при максимальном расчетном землетрясении, $\sup P(Q, I_7) = 1,6 \cdot 10^{-4}$, год⁻¹.

При этом «вклады» землетрясений различной интенсивности в оценку $\sup P(Q, I_{7,6,5,4})$ полной вероятности отказа сооружения соответственно составили: при 7 баллах – 33%; при 6 баллах – 41%; при 5 баллах – 20%; при 4 баллах – 6%. Более «рискованным» для сооружения оказалось землетрясение интенсивностью в 6 баллов.

В общем случае при оценке полной вероятности отказа сооружения $P(Q, I)$ могут учитываться: реакция объекта на сейсмические события разной интенсивности; спектральный состав различных землетрясений; последовательность разных характеристик сейсмической активности (моментов времени, мест, магнитуд, направлений и т.п.). Все эти факторы также могут выражаться через условные вероятности [6, 7]. Основы такого подхода к оценке сейсмического риска с учетом действия землетрясений разной интенсивности с использованием формулы полной вероятности были заложены в 60-х годах прошлого столетия и базировались они на работах Р. Уитмена и С. Корнелла [6].

Тем не менее, несмотря на перспективы, которые открывает количественное оценивание сейсмического риска в рамках вероятностного подхода [8], вопрос полезности таких оценок для решения практических задач минимизации сейсмической опасности все еще остается без ответа. Решение проблемы, по нашему мнению, здесь видится, прежде всего, в необходимости уточнения понятия сейсмического риска и его оценки в контексте принятия решений.

Многовековой опыт борьбы с последствиями землетрясений, накопленный человечеством, свидетельствует о том, что наиболее действенный способ их минимизации состоит в проведении заблаговременных и масштабных антисейсмических мероприятий еще при строительстве на сейсмоопасных территориях.

Антисейсмические мероприятия априори нуждаются в дополнительных затратах в сравнении со строительством в несейсмических районах. С точки зрения эффективности таких затрат они должны оправдываться снижением вероятных потерь (рисков ущерба) от землетрясений. При этом снижение вероятных потерь от землетрясений можно рассматривать как будущий эффект, а дополнительные затраты на антисейсмические мероприятия трактовать как составляющие сейсмического риска.

В условиях, когда роль экономической составляющей при решении проблем, связанных с безопасностью жизнедеятельности населения, возрастает, ключевым принципом обоснования решений относительно антисейсмических мероприятий может стать принцип разумно достижимого низкого уровня риска (*risk as low as reasonably practicable, ALARP*). В Великобритании и в других странах Британского Содружества этот принцип успешно практикуется в области промышленной безопасности с 70-х годов прошлого века [9].

В соответствии с принципом ALARP повышение безопасности населения и объектов в условиях природно-техногенного риска следует согласовывать с экономическими возможностями. Уровни сейсмического риска в сейсмически активных районах могут считаться приемлемыми во всех случаях, если они являются меньшими за установленную границу терпимости, и когда дальнейшее их уменьшение становится или практически невозможным при имеющихся экономических, технологических и др. условиях, или цена такого уменьшения становится непропорционально большой сравнительно с полученным повышением безопасности.

Принцип ALARP позволяет учитывать сложную природу сейсмического риска как объективно-субъективной категории, имеющей как отрицательную, так и положительную стороны. Сейсмический риск – это не только ожидание возможной расплаты за пренебрежение сейсмической опасностью. Это и пренебрежение возможной выгодой, которую можно получить от преодоления страха перед этой опасностью [10].

При принятии решений принцип ALARP относительно оценивания антисейсмических мероприятий можно в полной мере применить в рамках предложенного нами в [10] метода оценки полного риска альтернатив на основе их парного сравнения с учетом риска упущенных возможностей (упущенной выгоды).

Полный риск варианта относительно тех или иных антисейсмических мероприятий при этом будет включать две составляющие: собственный риск i -й альтернативы, формируемый дополнительными, в сравнении

с некоторым базовым (нулевым) вариантом, обобщенными приведенными затратами $\Delta C_i = C_i - C_0$ на реализацию соответствующих антисейсмических мероприятий; риск упущенных возможностей, определяемый дополнительным, в сравнении с базовым вариантом, снижением вероятных потерь (риска ущерба) от землетрясений $\Delta L_j = L_0 - L_j$ при альтернативных j -х антисейсмических мероприятиях. Имеем полный риск i -го варианта антисейсмических мероприятий при его сравнении с j -й альтернативой

$$R_{i,j} = \Delta C_i + \Delta L_j, \quad (9)$$

и, полный риск j -й альтернативы в сравнении с i -й:

$$R_{j,i} = \Delta C_j + \Delta L_i, \quad (10)$$

где $\Delta C_i = C_i - C_0$, $\Delta L_j = L_0 - L_j$, $\Delta C_j = C_j - C_0$, $\Delta L_i = L_0 - L_i$; C_0, C_i, C_j – обобщенные приведенные затраты на реализацию соответствующих альтернатив; L_0, L_i, L_j – вероятные потери (риски ущерба) при землетрясениях; $i, j = \overline{0, n}$, $i \neq j$; n – количество вариантов.

На рис. 2 приводится фрагмент таблицы решений для сравнения альтернативных антисейсмических мероприятий a_i, a_j по обобщенным рискам $R_{i,j}, R_{j,i}$ при $C_0 = 0$.

$a_i \setminus a_j$	a_0	...	a_i	a_j	...
a_0	–	...	ΔL_i	ΔL_j	...
...	...	–
a_i	C_i	...	–	$C_i + \Delta L_j$...
a_j	C_j	...	$C_j + \Delta L_i$	–	...
...	–

Рис. 2. Фрагмент таблицы решений $\|R_{i,j}\|$ при $C_0 = 0$

Каждому из n вариантов антисейсмических мероприятий может приписываться $n-1$ значений полного риска $R_{i,j}$. Таблица решений (см. рис.2) строится с упорядочением альтернатив $a_i, i = \overline{0, n}$, по увеличению дополнительных затрат ΔC_i . Сравнивая альтернативы, начиная из пары (a_0, a_1) с рисками $R_{0,1}, R_{1,0}$, и т. д., в результате отбираем оптимальный вариант по критерию минимального полного риска $R_{i,j}$ [10].

Предложенный подход позволяет формализовать процесс принятия решений относительно антисейсмических мероприятий с учетом различных факторов сейсмического риска, таких как затраты на антисейсмические мероприятия, а затраты, бесспорно, являются факторами риска, и факторов, с которыми можно связать упущенные возможности, ради чего, собственно, антисейсмические мероприятия осуществляются. Такой подход будет стимулировать получение адекватных количественных оценок сейсмических рисков, поскольку только в процессе принятия решений оценки рисков приобретают реальное практическое значение.

Библиографический список

1. Уломов В.И. Проблемы сейсмического районирования территории России / В.И. Уломов, Л.С. Шумилина // Всероссийский НИИ проблем научно-технического прогресса и информации в строительстве. – М.: ВНИИТПИ Госстроя России, 1999. – 56 с.
2. <http://seismos-u.ifz.ru/zoning.htm>
3. <http://seismos-u.ifz.ru/hazard.htm>
4. Гир Дж., Шах Х. Зыбкая твердь: Что такое землетрясение и как к нему подготовиться / Дж. Гир, Х. Шах. – М.: Мир, 1988. – 220 с.
1. 5. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений / С.В. Поляков – М.: Стройиздат, 1978. – 311 с.
5. Сейсмический риск и инженерные решения. Пер. с англ./ Под ред. Ц. Ломнитца, Э. Розенблюта. – М.: Недра, 1981. – 375 с.
6. Бугаенко С.Е. Прочность и надежность конструкций АЭС при экстремальных воздействиях / С.Е. Бугаенко, С.Л. Буторин, Г.С. Шульман, С.Г. Шульман. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 575 с.
7. <http://seismorus.ru/>
8. Маршалл В. Основные опасности химических производств / Маршалл В. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
9. Stefanyshyn D.V. A method of decision making at risk in natural resources use by pairwise comparison of alternatives with taking account of risks of lost opportunities / D.V. Stefanyshyn, Y.D. Stefanyshyna // Proc. of Int. Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems». July 7-11, 2009. – Saint-Petersburg, Russia. P.P. 435-439.