

УДК 519.8

Оценка ущерба от чрезвычайной ситуации в условиях неполных данных

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73

© Технологии гражданской безопасности, 2022

М.И. Ломакин, А.В. Докукин, В.Б. Мошков, И.Ю. Олтян, Ю.М. Ниязова

Аннотация

Рассматривается задача оценки ущерба от чрезвычайной ситуации при неполных данных о случайной величине времени ликвидации чрезвычайной ситуации, представленных малыми выборками. На основе имеющихся выборок значений времени ликвидации чрезвычайной ситуации определяются выборочные моменты распределения. Оценка величины ущерба от чрезвычайной ситуации находится с использованием результатов решения проблемы моментов как гарантированная (нижняя, верхняя) оценка определенного интеграла с кусочно-непрерывной подинтегральной функцией на множестве функций распределения с моментами, равными выборочным.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация; время ликвидации; случайная величина; функция распределения; моменты распределения.

Emergency Situation Damage Assessment in the Conditions of Incomplete Data

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73

© Civil Security Technology, 2022

M. Lomakin, A. Dokukin, V. Moshkov, I. Oltyan, Yu. Niyazova

Abstract

The problem of assessing damage from the emergency situation with incomplete data on the random value of the emergency response time presented by small samples is considered. Based on the available samples of emergency response time values, the sample distribution moments are determined. Estimation of the emergency situation damage magnitude is found using the results of solving the moment problem as a guaranteed (lower, upper) estimate of a certain integral with a piecewise continuous subintegral function on a set of distribution functions with the moments equal to the sample ones.

Key words: emergency situation; liquidation time; random variable; distribution function; moments of distribution.

19.07.2022

Одной из важных стратегических целей государственной и общественной безопасности Российской Федерации является защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [1].

В результате возникновения чрезвычайных ситуаций в 2020 г. в нашей стране погибло 326 человек, пострададо 6257 человек, ущерб составил 163 778 млн руб. [2].

В Российской Федерации создана и активно функционирует единая государственная система предупреждения и ликвидации ЧС (РСЧС) — система, объединяющая органы управления, силы и средства федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления и организаций, в полномочия которых входит решение вопросов в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [3]. Эффективность функционирования РСЧС существенно зависит от качества планирования работ по предупреждению и ликвидации ЧС, которые предполагают проведение оценки ущерба от возможных чрезвычайных ситуаций.

В работе авторов [3] предложена модель оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций. «Эта модель базируется на следующих положениях. Пусть возникла чрезвычайная ситуация, ущерб от которой зависит от времени ее развития следующим образом: если время ликвидации ξ чрезвычайной ситуации не превышает величину некоторого критического времени τ , то ущерб составит величину c_1 , в противном случае ущерб составит существенно большую величину c_2 , т.е. $c_2 \gg c_1$.

В общем случае критическое время для каждой чрезвычайной ситуации τ является случайной величиной, время ее ликвидации ξ также является случайной величиной. Каждая из этих величин определяется большим числом не всегда детерминированных факторов, поэтому утверждение о случайности этих величин является вполне правомерным. Тогда средний ущерб (математическое ожидание ущерба) при ликвидации чрезвычайной ситуации составит величину» [3]:

$$M(U) = c_1 P(\xi < \tau) + c_2 P(\xi \geq \tau). \quad (1)$$

В настоящей работе будем предполагать, что возможный ущерб от чрезвычайной ситуации зависит более сложным образом. Считаем, что эта зависимость следующая:

- на интервале $[0, tc_1]$ ущерб равен c_1 ;
- на интервале $[tc_1, tc_2]$ ущерб равен c_2 ;
- ...
- на интервале $[tc_{k-1}, tc_k]$ ущерб равен c_k ;
- ...
- на интервале $[tc_{m-1}, tc_m]$ ущерб равен c_m .

Величины tc_k, c_k ($k = 1, 2, \dots, m$) — фиксированные и известные.

Тогда средний ущерб (математическое ожидание ущерба) от чрезвычайной ситуации составит величину:

$$M(U) = \sum_{k=1}^m (\sum_{j=1}^k c_j) P(tc_{k-1} < \xi < tc_k). \quad (2)$$

В данном выражении вероятность

$$P_{\xi} = P(tc_{k-1} < \xi < tc_k) — \quad (3)$$

это вероятность ликвидации чрезвычайной ситуации в интервале $[tc_{k-1}, tc_k]$.

В случае, когда известна функция распределения $F(t)$ времени ликвидации чрезвычайной ситуации t , вероятность P_{ξ} определяется известным соотношением [2]:

$$P_{\xi} = P(tc_{k-1} < \xi < tc_k) = F(tc_k) - F(tc_{k-1}), \quad (4)$$

и нахождение величины ущерба (среднего значения, математического ожидания ущерба) не представляет трудности и величина ущерба может быть непосредственно определена по соотношению (2).

В реальной ситуации о случайной величине времени ликвидации чрезвычайной ситуации ξ имеется очень мало информации. Информация представлена малыми выборками значений величины ущерба, функция распределения которой обычно не известна. В таком случае возникает задача нахождения оценки величины ущерба от чрезвычайной ситуации на основе имеющихся реальных данных.

Цель настоящей работы состоит в нахождении оценки величины ущерба при неполных данных о времени ликвидации чрезвычайной ситуации.

Пусть в нашем распоряжении имеется выборка значений времени ликвидации чрезвычайной ситуации ξ :

$$V\xi = (\xi t_1, \xi t_2, \dots, \xi t_n). \quad (5)$$

В последнем соотношении n — объем выборки.

На основе выборки $V\xi$ определим s выборочных моментов распределения $F(t)$ по следующим соотношениям [4]:

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi t_j^i, i = 1, 2, \dots, s. \quad (6)$$

Далее определим множество функций распределения F_1 , у которых моменты распределения равны выборочным моментам μ_j , полученным на основе выборки $V\xi$ по соотношениям (6), т.е.:

$$F_1 = \{F(t) : \int_0^{\infty} t^i dF(t) = \mu_i, i = 1, 2, \dots, s\}. \quad (7)$$

Вследствие того, что в нашем распоряжении имеется неполная информация о времени ликвидации чрезвычайной ситуации, представленная выборкой значений времени ликвидации чрезвычайной ситуации $V\xi$, это приводит к необходимости нахождения гарантированной (нижней и верхней) оценки величины ущерба от чрезвычайной ситуации.

Задача нахождения гарантированной оценки величины ущерба от чрезвычайной ситуации может быть

сформулирована следующим образом: найти нижнюю и верхнюю оценки математического ожидания ущерба от чрезвычайной ситуации, определяемого соотношением (2), при условии, что функция распределения времени ликвидации чрезвычайной ситуации принадлежит множеству функций распределения F_j , определяемых соотношением (7), т. е. найти $M(U)_n$ и $M(U)_g$, что:

$$M(U) = \min \sum_{k=1}^m (\sum_{j=1}^k c_j) P(tc_{k-1} < \xi < tc_k); \quad (8)$$

$$M(U)_2 = \max \sum_{k=1}^m (\sum_{j=1}^k c_j) P(tc_{k-1} < \xi < tc_k); \quad (9)$$

$$F(t) \in F_1. \quad (10)$$

Преобразуем правую часть соотношения (2), имеем

$$\begin{aligned} M(U) &= \sum_{k=1}^m (\sum_{j=1}^k c_j) P(tc_{k-1} < \xi < tc_k) = \\ &= \sum_{k=1}^m Cc_k (F(tc_k) - F(tc_{k-1})) = \sum_{k=1}^m Cc_k \int_{tc_{k-1}}^{tc_k} dF(t). \end{aligned} \quad (11)$$

В последнем соотношении в соответствии со свойствами функции распределения [4] использовано следующее соотношение:

$$P(tc_{k-1} < \xi < tc_k) = F(tc_k) - F(tc_{k-1}) = \int_{tc_{k-1}}^{tc_k} dF(t), \quad (12)$$

величина Cc_k определяется следующим образом:

$$Cc_k = \sum_{j=1}^k c_j. \quad (13)$$

Правую часть соотношения (11) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} M(U) &= \sum_{k=1}^m Cc_k \int_{tc_{k-1}}^{tc_k} dF(t) = \\ &= \sum_{k=1}^m \int_{tc_{k-1}}^{tc_k} Cc_k dF(t) = \int_0^{tc_m} \varphi(t) dF(t). \end{aligned} \quad (14)$$

В последнем соотношении $\varphi(t)$ есть кусочно-непрерывная функция следующего вида:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_1; \\ 2, & t_1 \leq t < t_2; \\ \dots & \\ k, & t_{k-1} \leq t < t_k. \end{cases} \quad (15)$$

Задачи, определяемые соотношениями (8)–(10), могут быть сформулированы следующим образом: найти $M(U)_{H(B)}$, что

$$M(U)_{H(B)} = \min(\max) \int_0^{tc_m} \varphi(t) dF(t). \quad (16)$$

Для решения данных задач воспользуемся следующим результатом [5, 6].

«При заданных значениях $n + 1$ моментов

$$\int_0^\infty u_k(t) dF(t) = m_i; \quad i = \overline{0, n}.$$

существует наименьшее значение J_{\min} интеграла:

$$J = \int_a^b Q(t) dF(t), \quad (17)$$

и оно находится по правилу: если $n = 2v - 1$, то:

$$J_{\min} = \sum_{j=1}^v p_j Q(\tau_j), \quad (18)$$

где числа $p_j > (j = \overline{1, v})$ и $0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_v < \infty$ определяются из равенств

$$\sum_{j=1}^v p_j u_i(\tau_j) = m_i, \quad (i = \overline{0, n}). \quad (19)$$

Если $n = 2v - 2$, то минимум интеграла также определяется соотношением (18), числа $p_j > (j = \overline{1, v})$ и $0 = \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_v < \infty$ определяются из равенства (19)».

Для нахождения максимального значения интеграла (17) воспользуемся следующим результатом [5, 6].

«Если выполняется условие:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{Q(t)}{u_n(t)} \right) = c < \infty, \quad (20)$$

то J_{\max} при заданных моментах

$$\int_0^\infty u_k(t) dF(t) = m_i; \quad i = \overline{0, n}.$$

Существует и находится по следующему правилу: если $n = 2v - 1$, то:

$$J_{\max} = \sum_{j=1}^v p_j Q(\tau_j) + cM, \quad (21)$$

где числа $p_j > (j = \overline{1, v})$, $M > 0$, $0 = \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_v < \infty$ определяются из равенств:

$$\sum_{j=1}^v p_j u_i(\tau_j) = m_i, \quad (i = \overline{0, n-1}); \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^v p_j u_i(\tau_j) + M = m_i, \quad (i = \overline{n}). \quad (23)$$

Если $n = 2v - 2$, то максимум интеграла также определяется соотношением (21); числа $p_j > (j = \overline{1, v})$,

$M > 0, 0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_v < \infty$ определяются из равенств (22), (23)».

Аналогично работе [6] используем утверждение о том, что первые $n+1$ моментов образуют относительно системы функций $u_0(t), u_1(t), \dots, u_n(t)$ строго позитивную последовательность¹ на любом интервале $[a, b]$. В рассматриваемой нами задаче система функций $u_0(t), u_1(t), \dots, u_n(t)$ является степенной системой. В [5, с. 59] показано, что для системы степенных функций $1, t, t^{-2}, \dots, t^n$ данное предположение выполняется на любом интервале $[a, b]$.

В приведенных выше утверждениях предполагается, что функция $Q(t)$ является непрерывной на интервале $[a, b]$. В. А. Каштанов [7] обобщил приведенные утверждения для кусочно-непрерывных функций $Q(t)$ на заданном интервале.

В нашем случае $Q(t) = \varphi(t)$, которая является кусочно-непрерывной.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть на основе имеющейся выборки $V^{\xi} = (\xi t_1, \xi t_2, \dots, \xi t_n)$ значений времени ликвидации чрезвычайной ситуации получены значения двух моментов μ_1, μ_2 , при этом:

$$\mu_1 = 10^2 \text{ час.}, \mu_2 = 2 * 10^4 \text{ час.}^2;$$

- на интервале $[0, 0,5\mu_1]$ ущерб равен $c_1 = 10^6$ руб.;
- на интервале $[0,5\mu_1, \mu_1]$ ущерб равен $c_2 = 2 * 10^6$ руб.;
- на интервале $[\mu_1, 1, \mu_1]$ ущерб равен $c_3 = 4 * 10^6$ руб.;
- на интервале $[1,5\mu_1, 2\mu_1]$ ущерб равен $c_4 = 8 * 10^6$ руб.;
- на интервале $[2\mu_1, 2,5\mu_1]$ ущерб равен $c_5 = 15 * 10^6$ руб.

Необходимо найти нижнюю оценку величины ущерба при данных условиях.

Имеем $n = 2$, тогда из условия $n = 2v - 2, v = 2$ и, следовательно, $p_j > (j = \overline{1,2})$ и $0 = \tau_1 < \tau_2 < \infty$. Тогда нижняя оценка величины ущерба определится соотношением:

$$M(U)_{\underline{}} = p_1\varphi(\tau_1) + p_2\varphi(\tau_2). \quad (24)$$

Числа $p_j > (j = \overline{1,2})$ и $0 = \tau_1 < \tau_2 < \infty$ определяются из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} p_1 + p_2 = 1; \\ p_1\tau_1 + p_2\tau_2 = \mu_1; \\ p_1\tau_1^2 + p_2\tau_2^2 = \mu_2. \end{cases} \quad (25)$$

С учетом того, что $\tau_1 = 0$, находим, что:

$$p_1 = 1 - \frac{\mu_1^2}{\mu_2};$$

$$p_2 = \frac{\mu_1^2}{\mu_2};$$

$$\tau_2 = \frac{\mu_2}{\mu_1}.$$

В итоге получаем:

$$M(U)_H = (1 - \frac{\mu_1^2}{\mu_2})c_1 + \frac{\mu_1^2}{\mu_2}\varphi\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right). \quad (26)$$

В конечном итоге после преобразований получаем следующее соотношение для величины нижней оценки величины ущерба от чрезвычайной ситуации:

$$M(U)_H = c_1 + 0,67(c_2 + c_3). \quad (27)$$

Подставив численные значения соответствующих параметров, находим величину нижней оценки ущерба от чрезвычайной ситуации:

$$M(U)_H = 5020000 \text{ руб.}$$

Более детальное рассмотрение примеров оценки величины ущерба от возможных чрезвычайных ситуаций при большем (чем два момента) числе используемых моментов распределения времени ликвидации чрезвычайной ситуации предполагается рассмотреть в следующей статье.

Таким образом, в настоящей статье предложен подход к нахождению оценки величины ущерба от чрезвычайной ситуации при неполных данных о случайной величине времени ликвидации чрезвычайной ситуации, представленных малыми выборками. На основе имеющихся выборок значений времени ликвидации чрезвычайной ситуации определяются выборочные моменты распределения. Оценка величины ущерба от чрезвычайной ситуации находится с использованием результатов решения проблемы моментов как гарантированная (нижняя, верхняя) оценка определенного интеграла с кусочно-непрерывной подынтегральной функцией на множестве функций распределения с заданными моментами.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 2 июля 2021 г. № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». [Электронный ресурс] // URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/40391> (дата обращения: 12.05.2022).
2. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году». [Электронный ресурс] // URL: <https://www.mchs.gov.ru/dokumenty/5304> (дата обращения: 12.05.2022).
3. Ломакин М.И., Докукин А.В., Мошков В.Б., Олтян И.Ю., Ниязова Ю.М. Оценка ущерба чрезвычайных ситуаций // В сб.: Теория и практика гражданской защиты на страже безопасно-

- сти жизнедеятельности современного общества. М.: 2022. С. 158–160.
4. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Физматгиз, 1988. 406 с.
5. Крейн М.Г., Нудельман А.А. Проблема моментов Маркова и экстремальные задачи (Идеи и проблемы П.Л. Чебышева и А.А. Маркова и их дальнейшее развитие). М.: Наука, 1973. 551 с.
6. Ломакин М.И., Ниязова Ю.М., Докукин А.В., Злыднев М.И., Гарин А.В. Оценка качества бизнес-процессов предприятия в условиях неполных данных // Технология машиностроения. 2021. № 8. С. 54–60.
7. Каштанов В.А. О минимаксных стратегиях при ограничениях на моменты распределений // В кн. «Основные вопросы теории и практики надежности». 1980. С. 143–154.

¹ О позитивных последовательностях см. [5].

Сведения об авторах

Ломакин Михаил Иванович: д.т.н., д.э.н., проф., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), г. н. с. института.
Москва, Россия.
SPIN-код: 4943-3724.

Докукин Александр Владимирович: д.э.н., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), г. н. с. науч.-исслед. центра.
Москва, Россия.
SPIN-код: 6402-0280.

Мошков Владимир Борисович: к.э.н., доц., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), зам. начальника института.
Москва, Россия.
SPIN-код: 7792-2243.

Олтян Ирина Юрьевна: к.т.н., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), учёный секретарь.
Москва, Россия.
SPIN-код: 3476-5213.

Ниязова Юлия Михайловна: к.э.н., ФГБУ ВПО МИИГАиК, доцент.
Москва, Россия.
SPIN-код: 9558-1820.

Information about authors

Lomakin Mikhail I.: ScD (Technical Sc., Economic Sc.), Professor, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Chief Researcher of the Institute.
Moscow, Russia.
SPIN-scientific: 4943-3724.

Dokukin Aleksandr V.: ScD (Economic Sc.), All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Chief Researcher, Researcher Center.
Moscow, Russia.
SPIN-scientific: 6402-0280.

Moshkov Vladimir B.: PhD (Economic Sc.), All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Deputy Head of the Institute.
Moscow, Russia.
SPIN-scientific: 7792-2243.

Oltyan Irina Yu.: PhD (Technical Sc.), All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Scientific Secretary.
Moscow, Russia.
SPIN-scientific: 3476-5213.

Niyazova Julia M.: PhD (Economic Sc.), Moscow State University of Geodesy and Cartography, Assistant Professor.
Moscow, Russia.
SPIN-scientific: 9558-1820.

Издания ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)

Авторы, название	URL
<i>Олтян И.Ю. и др.</i> Реализация Сендайской рамочной программы по снижению риска бедствий в Российской Федерации. Итоги пятилетия.	https://elibrary.ru/item.asp?id=46389727
<i>Мануйло О.Л. и др.</i> Творчество юных во имя спасения. Литературно-художественный альманах. Выпуск № 5.	https://elibrary.ru/item.asp?id=46173686
Наука и технологии обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях: Материалы мероприятий деловой части программы, организатором которых выступил ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), Часть I.	https://elibrary.ru/item.asp?id=47150447
Наука и технологии обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях: Материалы мероприятий деловой части программы, организатором которых выступил ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), Часть II.	https://elibrary.ru/item.asp?id=47233683
Совершенствование защиты населения, материальных и культурных ценностей от опасностей, возникающих при военных конфликтах или вследствие этих конфликтов с учётом современных угроз. Материалы научно-практической конференции.	https://elibrary.ru/item.asp?id=47152118
<i>Мошков В.Б. и др.</i> Добровольная сертификация как инструмент повышения качества аварийно-спасательных средств.	https://elibrary.ru/item.asp?id=47276629
<i>Акимов В.А. и др.</i> Исследование чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера современными научными методами.	https://elibrary.ru/item.asp?id=47429574
<i>Мошков В.Б. и др.</i> I Международная научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom». Сборник материалов конференции.	https://elibrary.ru/item.asp?id=47781245
<i>Виноградов О.В. и др.</i> Основы прогнозирования параметров опасных зон для населения, проживающего вблизи районов размещения полигонов твердых бытовых отходов.	https://elibrary.ru/item.asp?id=48170922