

УДК 628.3

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА РИЗИКУ ДЛЯ НАСЕЛЕННЯ, ЩО ВЖИВАЄ ПИТНУ ВОДУ ПІСЛЯ АВАРІЇ НА СКЛАДІ БОЄПРИПАСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ДВОВИМІРНОГО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

С. М. Орел

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
вул. Гвардійська, 32, 79012, м. Львів, Україна. E-mail: oreism0@gmail.com

М. С. Мальований

Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна. E-mail: mmal@polynet.lviv.ua

Наведені результати імовірнісної оцінки ризику життєдіяльності населення, що вживає питну воду, забруднену хімічними сполуками після аварії на складі боєприпасів. Результати розрахунків ризику можливо ураження людей продуктами аварії – неканцерогенними та канцерогенними сполуками, що знаходяться у питній воді, – отримані з використанням двовимірного методу Монте-Карло. Показано, що використання двовимірного методу Монте-Карло для імовірнісного аналізу ризику дає додаткову інформацію для прийняття рішення про застосування заходів для його зниження, порівняно з використанням одновимірного методу або детермінованих значень. За допомогою отриманих трендових діаграм можна визначити не тільки відсоток населення, для якого значення ризику знаходиться в певних межах, але ймовірність того, що цей відсоток буде знаходитися саме в цих межах, або, навпаки, діапазон значень ризику для певного відсотка населення і ймовірність того, що значення ризику буде знаходитися саме в цьому діапазоні.

Ключові слова: ризик, питна вода, аварія на складі боєприпасів, імовірнісний розподіл, двовимірний метод Монте-Карло.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ, УПОТРЕБЛЯЮЩИХ ПИТЬЕВУЮ ВОДУ ПОСЛЕ АВАРИИ НА СКЛАДЕ БОЕПРИПАСОВ С ПОМОЩЬЮ ДВУХМЕРНОГО МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

С. М. Орел

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
ул. Гвардейская, 32, 79012, г. Львов, Украина. E-mail: oreism0@gmail.com

М. С. Малеваний

Национальный университет «Львовская политехника»
ул. С. Бандеры, 12, 79013, г. Львов, Украина. E-mail: mmal@polynet.lviv.ua

Приведены результаты вероятностной оценки риска жизнедеятельности населения, которое употребляет питьевую воду, загрязненную химическими соединениями после аварии на складе боеприпасов. Результаты расчетов риска возможного поражения людей продуктами аварии – неканцерогенными и канцерогенными веществами, находящимися в питьевой воде, – получены с использованием двумерного метода Монте-Карло. Показано, что использование двумерного метода Монте-Карло при вероятностном анализе риска, дает дополнительную информацию для принятия решения о применении дополнительных мер для его снижения, сравнительно с использованием одномерного метода или детерминированных значений. С помощью полученных трендовых диаграмм можно определить не только процент населения, для которого значения риска находятся в определенных пределах, но и вероятность того, что этот процент будет находиться именно в этих пределах. Или, наоборот, диапазон значений риска для определенного процента населения и вероятность того, что значение риска будет находиться именно в этом диапазоне.

Ключевые слова: риск, питьевая вода, авария на складе боеприпасов, вероятностное распределение, двумерный метод Монте-Карло.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Військова діяльність навіть у мирний час здійснює значний вплив на навколишнє середовище.

Забруднення та нанесення шкоди довкіллю і необхідність прийняття відповідних рішень для його зменшення, викликає потребу у створенні механізму оцінки стану довкілля, за допомогою якого можна було б приймати оптимальні рішення, які б забезпечували його захист з мінімальними затратами. Аналіз екологічного ризику є одним з ефективних інструментів, який об'єднує екологічні дані з управлінськими рішеннями [1].

Аналіз ризику складається з трьох етапів: оцін-

ки, управління та повідомлення про ризик, при цьому етап оцінки ризику є найбільш важливим.

Оцінка ризику супроводжується наявністю певних невизначеностей, що характеризують відсутність точних знань на кожному із складових етапу оцінки. Джерела невизначеностей наведені, наприклад, у [2–4]. У свою чергу, невизначеність можна поділити на необізнаність, тобто відсутність достатніх знань про специфічні фактори, параметри та моделі, що використовуються для аналізу ризику, і мінливість, тобто непостійність параметрів внаслідок їх природної гетерогенності [3]. Якщо необізнаність можна зменшити шляхом збору додатко-

вих даних, підвищенням точності вимірювання, удосконаленням моделей тощо, то зменшити мінливість цим шляхом неможливо.

У реальному житті оцінка ризику часто ґрунтується на використанні детермінованих, точкових даних. Значення вихідних величин звичайно використовуються консервативні, як правило, 0,9 або 0,95 квантиль їх розподілів.

Очевидно, що такий випадок використовується тоді, коли важливо не допустити недооцінки небезпеки. Зрозуміло, що надлишковий консерватизм може призвести до значних неоправданих матеріальних витрат у випадку застосування заходів щодо зниження ризику.

Для прийняття більш достовірного рішення варто оцінити ті невизначеності, які мають місце для оцінки ризику. Це може бути зроблено шляхом заміни точкових значень вихідних величин їх імовірнісними розподілами. У результаті модельних розрахунків замість точкового значення ризику отримуємо його розподіл.

Для побудови імовірнісного розподілу ризику, тобто «просування» невизначеностей з початку в кінець моделі, використовуються різні методи, де-

які з яких описані, наприклад, у [4]. Однак, найбільш популярним методом є числовий метод Монте-Карло. Суть методу полягає в тому, що модель, яка визначає значення ризику як функцію параметрів навколишнього середовища, поданих у вигляді імовірнісних розподілів, шляхом багатократного комбінування значень цих розподілів, обраних за випадковим законом, становить розподіл імовірності наявності ризику впливу небезпечної речовини у даній просторово-часовій області. Порівнюючи значення ризику з допустимим для даної області значенням, можна визначити область недопустимого ризику.

Метод отримав назву одновимірного методу Монте-Карло, оскільки за його допомогою можна оцінити вплив лише однієї складової невизначеності – або мінливості, або необізнаності. Змішування цих складових у процесі імовірнісної оцінки ризику за допомогою одновимірного методу Монте-Карло є недопустимим [4].

Для одночасної оцінки і мінливості та необізнаності використовується двовимірний метод Монте-Карло, суть якого зрозуміла з рис. 1.



Рисунок 1 – Сутність двовимірного методу Монте-Карло.

Для реалізації двовимірного методу Монте-Карло обирається випадкове значення величини із розподілу, що визначається необізнаністю (зовнішній цикл). Це значення «заморожується» і підставляється у розподіли, що визначаються мінливістю (для всієї моделі), і реалізується внутрішній цикл, аналогічний для одновимірного методу Монте-Карло. Корисність використання двовимірного методу Монте-Карло можна продемонструвати за допомогою рис. 2. На ньому відображені розподіли ризику для середнього значення величини, що характеризується необізнаністю (суцільна лінія) і верхньої та нижньої меж довірчого інтервалу цієї ж величини (пунктирні лінії).

Форма розподілів ризику визначається розподілами величин, що характеризуються мінливістю.

Аналізуючи рис. 2, можна визначити кількісну міру переконаності щодо частини населення, для якої величина ризику перевищує допустиме значення (вертикальна межа довірчого інтервалу). Скажімо у випадку використання оцінки ризику для його середнього значення можна стверджувати, що лише для 10 % населення це значення перевищує допустиму величину в 10^{-6} (точка перетину лінії розподілу ризику для середньої величини з

вертикальною межею довірчого інтервалу). Враховуючи ж необізнаність, можна стверджувати, що з певною імовірністю, встановленою для даного довірчого інтервалу (наприклад 95 %), не більше ніж для 20 % населення значення ризику буде перевищувати допустиме (точка перетину лінії розподілу ризику для верхньої межі довірчого інтервалу з вертикальною межею довірчого інтервалу).

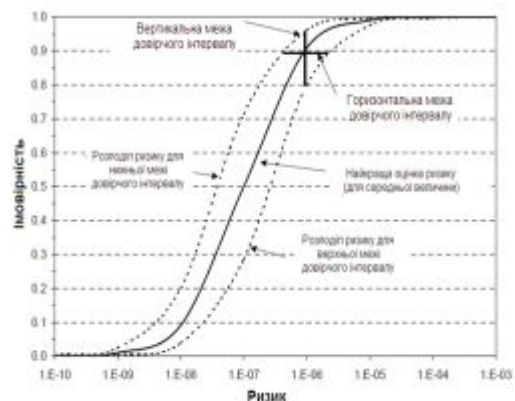


Рисунок 2 – Ілюстрація оцінки ризику при використанні двовимірного методу Монте-Карло

Додатково можна визначити кількісну міру переконаності щодо оцінки ризику для частини населення, для якої значення ризику перевищує допустиме значення (горизонтальна межа довірчого інтервалу). У той час, коли, використовуючи оцінку ризику для середньої величини, можна стверджувати, що лише для 10 % населення значення ризику перевищує допустиме значення 10^{-6} , то з урахуванням необізнаності можна додати, що з певною імовірністю, встановленою для даного довірчого інтервалу, для цієї частини населення величина ризику не буде перевищувати $2 \cdot 10^{-6}$ (точка перетину лінії розподілу ризику для верхньої межі довірчого інтервалу з горизонтальною межею довірчого інтервалу).

Слід зауважити, що термін «довірчий інтервал» у нашому випадку трактується доволі вільно і не обов'язково відповідає тому значенню, яке можна отримати у випадку проведення статистичного аналізу дослідних даних. Довжини вертикальної та горизонтальної меж довірчого інтервалу можуть визначатися будь-якими квантилями розподілу величини, що визначається необізнаністю.

За допомогою двовимірного методу Монте-Карло можна побудувати аналогічні розподіли для будь-яких значень меж довірчого інтервалу і побу-

дувати трендову діаграму, на якій відобразити довірчі інтервали для будь-якого квантиля розподілу ризику.

Метою роботи є на конкретному прикладі показати важливість та корисність застосування імовірнісного методу оцінки ризику для здоров'я населення у випадку забруднення довкілля, за допомогою двовимірного методу Монте-Карло.

МАТЕРІАЛИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Основою для проведення досліджень є матеріали роботи [5], в якій проводиться детермінована оцінка ризику життєдіяльності населення, що вживає питну воду, забруднену хімічними сполуками після аварії на складі боєприпасів у смт Новобогданівка Запорізької області 6–15 травня 2004 року.

Після аварії у р. Молочна, воду якої, очевидно, використовує населення с. Троїцьке як джерело питної води, потрапили хімічні речовини, які змінили її склад. Вміст забруднювачів у воді наведений у табл. 1.

У роботі не наведені дані про склад води до аварії, тому можна оцінити не додатковий ризик від вживання забрудненої води внаслідок аварії, а загальний ризик від вживання питної води.

Таблиця 1 – Дані про наявність розчинних форм неорганічних сполук у поверхневих водах р. Молочна [5]

Параметр	Cu	Mn	Zn	Cd	Pb	Cr	Ni	Fe
Концентрація іонів у воді, мг/л	9,5±0,9	0,414±0,004	0,97±0,1	0,021±0,001	0,62±0,4	0,239±0,002	1,06±0,06	11,6±0,3

У роботі [2] за даними [5] проведена імовірнісна оцінка ризику із використанням одновимірного методу Монте-Карло, тобто визначався вплив лише мінливості вихідних параметрів на розподіл значення ризику. Вихідними параметрами були концентрація забруднювачів у воді та нормована на одиницю маси добова кількість спожитої води. Передбачалось, що розподіл концентрацій забруднювачів у воді визначається виключно мінливістю, наприклад, через сезонні опади, тощо. У цій роботі зроблена спроба оцінки ризику в умовах, коли розподіл концентрацій визначається невизначеністю, наприклад, через різні умови вимірювання концентрації. Нормована на одиницю маси добова кількість спожитої води, зрозуміло, визначається мінливістю через індивідуальні особливості організму людини. У такому випадку роздільний вплив мінливості та необізнаності на невизначеність визначається за допомогою двовимірного методу Монте-Карло.

Канцерогенний ризик визначається за рівнянням:

$$RISK = \sum_{i=1}^{N_R} ICR_i, \quad (1)$$

де *RISK* – значення повного індивідуального канцерогенного ризику, викликаного дією N_R канцерогенів; *ICR* – значення індивідуального канце-

рогенного ризику, викликаного дією *i*-го канцерогену; N_R – загальна кількість канцерогенів у воді.

$$ICR = ADD \cdot SF, \quad (2)$$

де *ADD* – нормована на одиницю маси середньодобова доза шкідливої хімічної речовини, що споживається реципієнтом, мг/(кг·добу); *SF* – фактор ризику для цієї речовини, який характеризує ступінь наростання канцерогенного ризику із збільшенням дози на одну одиницю, [мг/(кг·добу)]⁻¹.

Неканцерогенний ризик визначається індексом небезпеки *HI*:

$$HI = \sum_{j=1}^N HQ_j, \quad (3)$$

де *HQ_j* – коефіцієнт небезпеки *j*-тої речовини;

$$HQ = ADD/RfD, \quad (4)$$

де *RfD* – референтна доза, величина, що характеризує добову дію хімічної речовини протягом усього життя і, ймовірно, не призводить до виникнення неприйнятної ризику для здоров'я чутливих груп населення, мг/(кг·добу).

Згідно із [6] при вживанні питної води:

$$ADD = (C_w \cdot IRW) / 1000, \quad (5)$$

де *C_w* – концентрація хімічної речовини у питній воді, мг/л; *IRW* – нормована на одиницю маси

кількість питної води, спожитої людиною за добу, мл/(кг·добу).

Для оцінки ризику розподіл концентрацій забруднюючих речовин приймається як усічений нормальний (концентрація не може мати від'ємного значення) із середнім значенням і стандартним відхиленням наведеними у табл. 1. Згідно із [6] розподіл нормованої на одиницю маси кількості питної води, спожитої людиною за добу (*IRW*), має форму логнормального розподілу з параметрами, яка залежить від віку людини, що споживає воду. μ – середнє значення натурального логарифму *IRW*; σ – стандартне відхилення натурального логарифму *IRW*.

У табл. 2 наведені параметри розподілів, що визначають кількість питної води, спожитою людиною за добу.

Оцінка ризику проводилась для населення різних вікових груп: дітей – 1–6 років, підлітків – 7–14 років і дорослих – 15–75 і старше років. Результати імітаційного моделювання розподілів ризиків за допомогою двовимірного методу Монте-Карло після 10 000 ітерацій для невизначеності і 10 ітерацій для необізнаності наведені на рисунку 3. Моделювання здійснювалось за допомогою елект-

ронних таблиць Excel® та надбудови над ними Crystal Ball®.

Таблиця 2 – Значення параметрів для логнормальних розподілів кількості питної води, спожитої людиною за добу (*IRW*), мл/(кг·добу) [6]

Вікова група, роки	μ	σ	Нижня межа	Верхня межа
1-3	3,49	0,75	5,81	186,49
4-6	3,33	0,68	5,80	135,78
7-10	2,97	0,68	4,04	94,71
11-14	2,66	0,71	2,77	74,24
15-19	2,43	0,74	2,02	63,93
20-44	2,61	0,68	2,77	67,11
45-64	2,92	0,52	5,45	62,71
65-74	2,92	0,49	5,92	58,47
75+	2,88	0,50	5,61	56,84

Для імовірнісної оцінки ризику, що здійснюється за допомогою двовимірного методу Монте-Карло зручно користуватися трендовими діаграмами. На рис. 3 наведені тренди для оцінки канцерогенного ризику та індексу небезпеки для оцінки неканцерогенного ризику для всіх категорій населення.

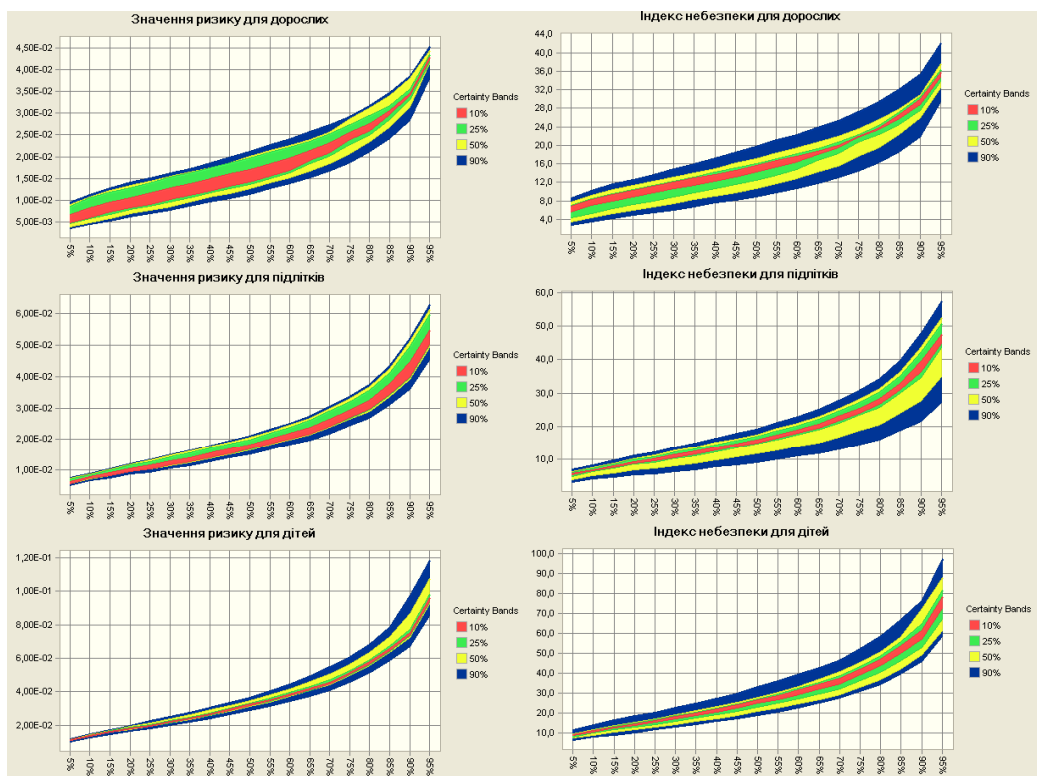


Рисунок 3 – Трендові діаграми імовірнісної оцінки канцерогенного ризику і індексу небезпеки для оцінки неканцерогенного ризику для всіх категорій населення при вживанні забрудненої питної вод

На трендових діаграмах відображені зони рівної імовірності досягнення певних значень канцерогенного та неканцерогенного ризиків (вісь ординат) для певного відсотка населення (вісь абсцис). Так, наприклад, можна стверджувати, що для 50 % дорослого населення значення канцерогенного ризику з імовірністю 90 % буде знаходитися в межах

$(1,2-2,2) \cdot 10^{-2}$, а для 90 % цього ж населення і з тією ж імовірністю в межах $(2,8-3,8) \cdot 10^{-2}$. З імовірністю 10 % ці значення відповідно будуть становити $(1,7-2,1) \cdot 10^{-2}$ та $(3,4-3,5) \cdot 10^{-2}$.

ВИСНОВКИ.

1) Імовірнісний аналіз ризику з використанням двовимірного методу Монте-Карло забезпечує ще

більше додаткової інформації порівняно з одновимірним методом і детермінованою оцінкою для прийняття рішення про застосування заходів для його зниження.

2) Оцінку ризику слід проводити поетапно, від простої (детермінованої) до більш складної (використання одновимірного, а пізніше і двовимірного методу Монте-Карло), тоді, коли виникають наступні потреби:

– необхідно встановити пріоритети серед територій, забруднювачів, маршрутів переносу забруднювачів, категорій населення та інших факторів ризику;

– ресурси для виконання природозахисних заходів обмежені;

– значні наслідки від прийняття неправильних рішень;

– отриманої або доступної інформації недостатньо для прийняття достовірного рішення.

3) Що ж стосується питання живання розглянутої забрудненої води, то однозначно дана вода не придатна для вживання.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society* / Ed. by Paul C. Stern and Harvey V. Fineberg. – Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. – 264 p.

2. Імовірнісна оцінка ризику для населення, що вживає питну воду після аварії на складі боєприпасів / С.М. Орел, М.С. Мальований // *Екологічна безпека*. – 2012. – Вип. 2(14). – С. 46–51.

3. *Science and judgment in risk assessment*. – Washington, D.C.: National Academy Press, 1994. – 668 p.

4. EPA 540-R-02-002. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment*. Vol. III. Part A. [Електронний ресурс] – Washington, DC, 2001. – Режим доступу: <http://www.epa.gov/superfund/RAGS3A/index.htm>.

5. Оцінка ризику для населення, що вживає питну воду після аварії на складі боєприпасів / С.І. Азаров, В.І. Паламарчук, В.Л. Сидоренко // *Вісник КДУ імені Михайла Остроградського*. – 2010. – Вип. 5 (64), ч. 1. – С. 141–144.

6. *Guidance for use of probabilistic analysis in human health risk assessments*. – Portland, Oreg.: DEQ, 1998. – 158 p.

PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT FOR POPULATION, WHICH CONSUME DRINKING WATER AFTER ACCIDENT ON AN AMMUNITION DEPOT WITH THE HELP OF TWO-DIMENSIONAL MONTE CARLO SIMULATION

S. Orel

Hetman Peter Sagaydachniy Academy of the Ground Forces
vul. Gvardiys'ka, 32, Lviv, 79012, Ukraine. E-mail: orelsm0@gmail.com

M. Malyovaniy

National university «Lviv's polytechnic»
vul. S. Bandera, 12, 79013, Lviv, Ukraine. E-mail: mmal@polynet.lviv.ua

The results of probabilistic risk assessment of vital functions of population, which uses a drinking water, contaminated by chemical compounds after accident on an ammunition depot, is considered. These results were obtained with the help of two-dimensional Monte Carlo simulation of risk equations for noncarcinogenic and carcinogenic compounds which are in a drinking-water. It is shown that the usage of two-dimensional Monte Carlo simulation gives additional information for the decision-making about application of additional measures for his decline, comparative with the use of one-dimensional Monte Carlo simulation or determined values in risk equations. With the help of trend diagrams it is possible to define not only the percent of population for which values of risk are in certain limits, but also probability of that this percent will be exactly in these limits. Or, vice versa, range of values of risk for the certain percent of population and probability of that the value of risk will be exactly in this range.

Key words: risk, drinking water, accident on an ammunition depot, probabilistic distribution, two-dimensional Monte Carlo simulation.

REFERENCES

1. *Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society* / Ed. by Paul C. Stern and Harvey V. Fineberg. – Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. – 264 p.

2. Probabilistic risk assessment for population, which consume drinking water after accident on an ammunition depot / S.M. Orel, M.S. Malovanyy // *Ecological Safety* – 2012. – N2(12). – P. 46–51 (in Ukrainian).

3. *Science and judgment in risk assessment*. – Washington, D.C.: National Academy Press, 1994. – 668 p.

4. EPA 540-R-02-002. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Conducting Probabilistic*

Risk Assessment. Vol. III. Part A. [Electronic resource]. – Washington, DC, 2001. – Access: <http://www.epa.gov/superfund/RAGS3A/index.htm>.

5. Risk assessment for population, which uses drinking water after damage on ammunition dump / S.I. Azarov, V.I. Palamarchuk, V.L. Sydorenko // *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university* – 2010. – N5 (64), pt.1. – P. 141–144 (in Ukrainian).

6. *Guidance for use of probabilistic analysis in human health risk assessments*. – Portland, Oreg.: DEQ, 1998. – 158 p.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. Шмандієм В.М..