

**УДК 624.05**

И.А. СОЛОМАТИН, студент гр. ТБм(УБП)-2  
Научный руководитель: Е.Э. СМИРНОВА, к.т.н., доцент  
СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург

**РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО**

*Аннотация.* В статье обсуждается проблема управления экологической безопасностью на основе современных средств по предотвращению рисков и угроз, вызванных техногенными авариями, природными катастрофами и разнообразными стратегиями расточительства. Риск-ориентированный подход на основе метода Монте-Карло является эффективным инструментом для исследования рисков и мониторинга безопасности не только в разных областях социально-экономической жизни, но и в аспекте научного обоснования и разработки проектных решений, формирующих безопасную среду обитания человека. Авторами рассматриваются характеристики метода Монте-Карло и алгоритм Лемера для генерации случайных чисел.

*Ключевые слова:* алгоритм Лемера, метод Монте-Карло, моделирование, риск, случайность, стохастические методы, экологическая безопасность

Сегодня экологическая безопасность является неотъемлемым атрибутом развития современного мира. Она требует радикального изменения императивов и ценностей современной цивилизации, а также обновления мировоззрения. Именно рациональное использование, сохранение, восстановление и приумножение природных «активов» способно сформировать среду, безопасную для здоровья и жизнедеятельности человека, с возможностью воспроизводства следующих поколений, а также поддержки самого существования человечества. [1,2] В скором времени потенциальный ущерб от антропогенного прессинга экосистем планеты может достичь огромных масштабов: истощение природного капитала до конца этого века (иначе говоря, ущерб, нанесенный окружающей среде) оценивается двузначным значением от 100% всего мирового ВВП. [3]

Истощение природных ресурсов в сочетании с быстрым ростом населения увеличивает бедность, создавая порочный круг деградации и упадка как местных человеческих сообществ, так и экосистем. События последнего времени (достижение пределов роста, глобальное изменение климата, угрожающее загрязнение атмосферы и Мирового океана, наличие факторов пандемии и войны за новые территории) вынуждают большинство современных стран прилагать экстраординарные усилия для выработки эффективных подходов к реализации требований экологической безопасности. [4]

В соответствии с концепцией В. Вернадского, управление переходом к ноосфере неотделимо от необходимости предотвращения экологической

катастрофы. Управление экологической безопасностью должно сосредоточиться на современных средствах предотвращения угроз и ликвидации их последствий, вызванных техногенными авариями, природными катастрофами и в целом стратегией уничтожения всего живого. [5]

Имитационное моделирование с помощью метода Монте-Карло — одно из современных средств с целью получить достоверные результаты исследования в области экологической безопасности. [6, 7] Чтобы уяснить метод Монте-Карло, рассмотрим задачу с вычислением интеграла  $\int_a^b f(x)dx$ , где  $f(x)$  является элементарной непрерывной функцией на интервале  $[0, 1]$  при  $0 \leq f(x) \leq 1$ . Заменим данный интеграл геометрическим:  $\int_0^1 f(x)dx$ . Иначе говоря, получаем площадь области  $S$  под кривой  $y = f(x)$  (см. рис. 1 и 2).

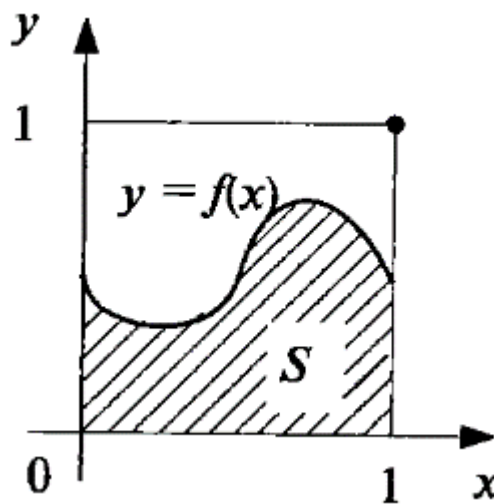


Рисунок 1. Обычный алгоритм интегрирования методом Монте-Карло

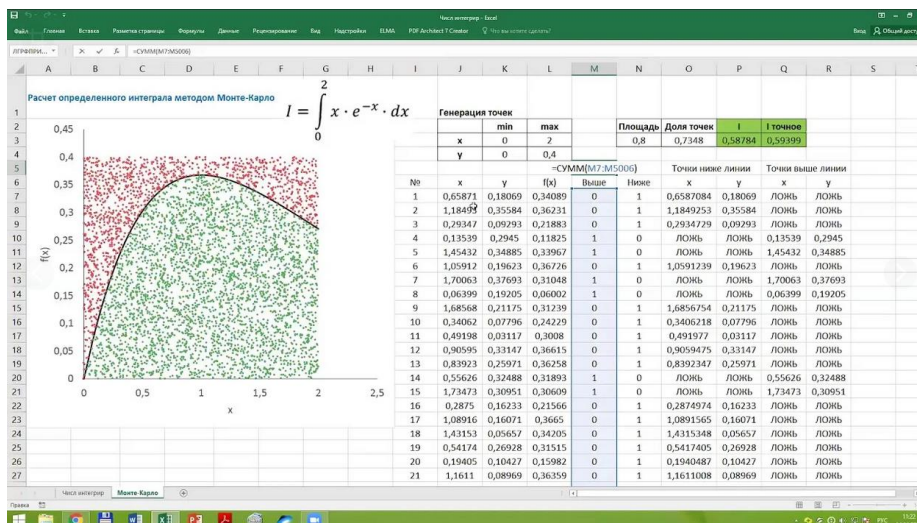


Рис. 2. Расчет определенного интеграла методом Монте-Карло в программе Excel

Используем определение вероятного события — попадания брошенной случайной точки  $A$  в область  $S$ . Его вероятность есть отношение площади фигуры  $S$  к площади квадрата:

$$p(A) = \frac{S}{1^2} = \int_a^b f(x)dx \quad (1)$$

Чем больше точек со случайными координатами  $(x, y)$  попадет в область фигуры  $S$ , тем точнее будет вычисление.

По теореме Бернулли, чтобы оценить искомую вероятность  $p(A)$  в случае достаточно большого числа испытаний  $n$ , необходимо взять соотношение  $m/n$  (т.е. по результатам случайных опытов следует ограничиться приближенным значением интеграла).

Отличительной особенностью применения метода Монте-Карло служит указание на доверительную вероятность истинного значения вычисляемого интеграла. Границы истинного значения неизвестной величины указываются лишь примерно, а не точно. [8, 9]

Разумеется, реализация метода Монте-Карло не связана с проведением реальных опытов с попаданием случайной точки  $A$  под график функции в квадрате. С этой целью пользуются специальными компьютерными программами или датчиками случайных чисел (вернее, «псевдослучайных» чисел, не в полной мере удовлетворяющих требованиям случайности). [10]

В ходе такого рода программного испытания реализуется каждый раз новая, не похожая на предыдущие реализация случайного «розыгрыша». Далее обычными методами математической статистики обрабатывается множество реализаций искусственно полученного статистического материала с целью получения приближенно любых характеристик. [11, 12]

Генератор случайных чисел, распределённых равномерно (нормально), есть основа метода Монте-Карло. В их генерации применяются специальные алгоритмы для расчета бесконечной последовательности чисел; при этом их значения всякий раз попадают в интервал от 0 до 1. Случайным числам присущи свойства равномерности, независимости и случайности.

Равномерность ( $R_0$ ) означает одинаковую частоту, с которой числа принимают значения от 0 до 1; независимость ( $m$ ) – отсутствие зависимости случайных чисел от любых предыдущих; случайность ( $a$ ) – отсутствие в них закономерного порядка.

Алгоритм Лемера (с параметрами  $R_0$ ,  $m$  и  $a$ ), представляющий собой быстрый способ нахождения общего наибольшего делителя, подходит для исчисления больших случайных чисел. При отладке алгоритма требуется осуществить подбор значений. [13]

На первом шаге процедуры получения случайных чисел необходимо найти произведение  $a$  и  $R_{n-1}$ , где  $n$  – номер искомого значения:

$$a \times R_{n-1} \quad (1)$$

Далее следует рассчитать величину  $R_n$  как результат деления найденного произведения на  $m$ :

$$R_n = \text{mod}\left(\frac{a \times R_{n-1}}{m}\right), \quad (2)$$

где  $\text{mod}$  – остаток деления.

Затем находим случайное число в соответствии с формулой:

$$R = \frac{R_n}{m}. \quad (3)$$

Следующий пример демонстрирует данную процедуру. При значениях  $a = 6$ ,  $m = 9$ ,  $R_0 = 2$  вычисляем сначала произведение  $aR_{n-1}$ :

$$a \times R_{n-1} = a \times R_0 = 6 \times 2 = 12. \quad (4)$$

Находим величину  $R_n$  и  $R$ :

$$R_n = R_1 = \text{mod}\left(\frac{12}{9}\right) = 3, \quad (5)$$

$$R = \frac{R_n}{m} = \frac{3}{9} = 0,3333. \quad (6)$$

Зная  $R$ , вычисляем  $R_1 = 0,2222$  ( $2/9$ ),  $R_2 = 0,3333$  ( $3/9$ ) и т.д.

Данные методики позволяют заблаговременно оценить риски потенциального негативного воздействия техногенеза на окружающую среду, максимально предотвратить ошибки, связанные с «человеческим фактором», а также запланировать мероприятия по своевременной защите экосистем. [14]

Поскольку при имитационном моделировании Монте-Карло происходит розыгрыш большого числа сценариев, то данный подход можно назвать развитием сценарного. Анализ значений выходных показателей модели и ясно сформулированные сценарии позволяют дать оценку возможному интервалу их изменения с учетом различных условий реализации того или иного проекта.

Таким образом, наряду с ужесточением природоохранного законодательства, модернизированными методами хозяйствования и более эффективными технологиями численные методы, включая метод Монте-Карло, и техники стохастического исчисления в целом служат целям создания и сохранения гуманной, экологически устойчивой среды для благоприятной жизнедеятельности не только человека, но и всего живого. [15]

## Список литературы:

1. Capra F. *The Hidden Connections: Integrating the Biological, Cognitive, and Social Dimensions of Life into a Science of Sustainability* // F. Capra. – New York: Doubleday, 2002. – 300 p.
2. Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W. *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind* // D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W. Behrens. – New York: Universe Books, 1982. – 211 p.
3. Piketty T. *Capital in the Twenty-First Century* // T. Piketty. – Cambridge, London: The Belknap Press of Harvard University Press, 2014. – 452 p.
4. Смирнова Е.Э. *Экология* // Е.Э. Смирнова. – М.: Ютас, 2010. – 100 с.
5. Вернадский В.И. *Биосфера и ноосфера* // В.И. Вернадский. – М.: Айрис-Пресс, 2012. – 261 с.
6. Smirnova E. Monte Carlo simulation of environmental risks of technogenic impact / E. Smirnova // *Contemporary Problems of Architecture and Construction* / E. Rybnov, P. Akimov, M. Khalvashi, E. Vardanyan (Eds.). – London: CRC Press, 2021. – С. 355–360. DOI: 10.1201/9781003176428
7. Smirnova E. Environmental risk analysis in construction under uncertainty / E. Smirnova // *Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage* / S. Sementsov, A. Leontyev, S. Huerta, I. Menéndez Pidal de Nava (Eds.). – London: CRC Press, 2020. – С. 222–227. DOI: 10.1201/9781003129097-47
8. Larionov A. Risk assessment models to improve environmental safety in the field of the economy and organization of construction: A case study of Russia / A. Larionov, E. Nezhnikova, E. Smirnova // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13. – № 24. – С. 13539. DOI: 10.3390/su132413539
9. Nezhnikova E. Ecological risk assessment to substantiate the efficiency of the economy and the organization of construction / E. Nezhnikova, A. Larionov, E. Smirnova // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. – 2021. – Vol. 27. – № 8. – С. 2069–2079. DOI: 10.1080/10807039.2021.1949262
10. Smirnova E. The use of the Monte Carlo method for predicting environmental risk in construction zones / E. Smirnova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1614. – С. 012083. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012083
11. Смородинский С.С. *Оптимизация решений на основе компьютерных имитационных методов и моделей* // С.С. Смородинский, Н.В. Батин. – Минск: БГУИР, 2004. – Ч. 1. – 79 с.
12. Савелова Т.И. *Метод Монте-Карло* // Т.И. Савелова – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 152 с.
13. Окунь Е.В., Гробер Т.А. Применение численных методов монте-карло в имитационном моделировании / Е.В. Окунь, Т.А. Гробер // *Молодой исследователь Дона*. 2021. Т. 31. № 4. С. 8-11.

14. Mamedov S. Application of statistical methods to assess environmental safety risks in construction / E. Smirnova, S. Mamedov, A. Shkarovskiy // Rocznik Ochrona Środowiska [Annual Set The Environment Protection]. – 2022. – Т. 24. – In press.
15. Ларин Д.В. Методологические проблемы экологической безопасности в строительстве и городском хозяйстве / Е.Э. Смирнова, Д.В. Ларин // Обращение с отходами: современное состояние и перспективы. Сборник статей II Международной научно-практической конференции, г. Уфа, 10 ноября 2020 г. / Под ред. И.О. Туктаровой. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. – С. 284–290.