

ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА/PROBABILITY THEORY AND MATHEMATICAL STATISTICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.71>

ГЕНЕРАТОР СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ ДЛЯ ИМИТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ЧИСЛЕННОСТИ ПТИЦ НА ТЕРРИТОРИИ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Научная статья

Найдыш А.В.¹, Петренко И.А.^{2,*}, Чепурной М.П.³

^{1,3} Мелитопольский государственный университет, Мелитополь, Российская Федерация

² Северо-Кавказский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, Минеральные Воды, Российской Федерации

* Корреспондирующий автор (pia63[at]mail.ru)

Аннотация

Предложен алгоритм получения случайных чисел, подчиняющихся произвольной интегральной функции распределения, и разработана программа *Generator* для генерирования выборочных данных в соответствии с этой функцией. Тестирование программы проводилось путём сравнения выборок, которые формировались с использованием предлагаемого метода для различных распределений, с выборочными данными, рассчитанными с помощью известных стандартных функций. Результаты вычислений статистических параметров для нормального, показательного и синусоидального распределений, найденных с помощью программы *Generator*, хорошо согласуются с расчётами, которые получены с использованием стандартных функций. Метод достаточно прост и может быть легко реализован на любом алгоритмическом языке, обеспечивающем возможность подключения функции для получения случайных целых чисел. Полученные данные рекомендуются использовать при моделировании влияния ветровых электростанций на птиц с использованием результатов мониторинговых мероприятий на их территории и в буферных зонах.

Ключевые слова: генератор случайных чисел, интегральная функция распределения, законы распределения случайных чисел, критерий Пирсона, ветровая электростанция.

RANDOM NUMBER GENERATOR FOR SIMULATING THE RESULTS OF MONITORING BIRD POPULATIONS IN THE TERRITORY OF WIND POWER PLANTS

Research article

Найдыш А.В.¹, Петренко И.А.^{2,*}, Чепурной М.П.³

^{1,3} Melitopol State University, Melitopol, Russian Federation

² North Caucasian branch of Belgorod state technological University named after. V. G. Shukhov, Mineralnye Vody, Russian Federation

* Corresponding author (pia63[at]mail.ru)

Abstract

An algorithm for obtaining random numbers that obey an arbitrary integral distribution function has been suggested, and a programme called *Generator* has been developed to produce sample data in accordance with this function. The programme was tested by comparing samples generated using the proposed method for various distributions with sample data calculated using known standard functions. The results of calculating statistical parameters for normal, exponential, and sinusoidal distributions found using the *Generator* programme are well in agreement with the calculations obtained using standard functions. The method is quite simple and can be easily implemented in any algorithmic language that provides the ability to connect a function for generating random integers. The findings are recommended for use in modelling the impact of wind farms on birds using the results of monitoring activities in their territory and buffer zones.

Keywords: random number generator, cumulative distribution function, random number distribution laws, Pearson criterion, wind power station.

Введение

1.1. Постановка проблемы

Использование генераторов случайных величин позволяет решать ряд практически важных задач, относящихся к выбору оптимального числа участков наблюдения, оценке доверительных интервалов для измеряемых характеристик, оценке точности прогнозирования тех или иных параметров, зависящих от многих условий, и т.д.

В частности, актуальными являются выбор оптимального количества и размера площадок наблюдения за птицами на территории ветровой электростанции при организации мониторинговых мероприятий с целью исследования влияния турбин на орнитофауну в зоне эксплуатации ВЭС, оценка доверительных интервалов для измеряемых характеристик птиц, оценка точности прогнозирования тех или иных параметров орнитокомплексов.

Всё возрастающее увеличение производственных мощностей в области ветровой энергетики требует существенных материальных затрат на проведение исследований влияния турбин ветровых электростанций (ВЭС) на птиц и рукокрылых. Предварительная орнитологическая экспертиза на территории будущей станции является первым шагом перед принятием решения о возможности её строительства. Мониторинговые мероприятия по изучению влияния конкретного ветрового парка на орнитокомплексы птиц, как правило, продолжаются в течение всего периода

его эксплуатации [1], [2], [3], [4]. Специфика статистического анализа результатов мониторинга состоит в том, что, несмотря на огромный массив измеренных характеристик птиц, численность которых иногда достигает десятков тысяч и более особей различного вида, наблюдатель не имеет возможности повторить условия получения данных. В этом случае целесообразно обратиться к методам математического моделирования ситуации. Один из методов численного моделирования связан с генерированием случайных величин в соответствии с теми законами распределения, которые наиболее часто встречаются в задачах орнитологии. К ним относятся, например, нормальный закон, распределение Стьюдента, экспоненциальное распределение, а также нестандартные многофакторные функции распределения.

1.2. Цель выполнения работы и постановка задачи

Цель исследования состоит в разработке генераторов случайных величин, которые подчиняются законам распределения, используемых при статистическом анализе результатов мониторинга орнитокомплексов на территории ВЭС. Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ генераторов случайных чисел для получения выборочных данных, подчиняющихся законам распределения, которые могут использоваться при моделировании ситуаций, связанных с анализом влияния ВЭС на птиц;
- разработать алгоритм и создать программу для генерирования случайных чисел с произвольным законом распределения.

Результаты работы

2.1. Анализ алгоритмов и методов генерирования случайных чисел

Для получения случайных чисел с заданным распределением обычно применяется генератор случайных чисел с равномерным распределением [5], [6]. В качестве примера можно сослаться на труды Д. Бокса, М. Мюллера-Д. Марсальи [5], которые посвящены алгоритмам получения нормально распределённых выборочных данных в соответствии с законом Лапласа. Описание различных методов генерирования нормально распределённых случайных чисел можно найти во многих публикациях [5], [6], [8], [9].

В работе [10] проведён сравнительный анализ получения случайных величин методом Д. Бокса, методом М. Мюллера-Д. Марсальи и с использованием стандартной функции `normal_distribution` в среде программирования Visual C++. Сгенерированные числа представлялись в виде интервального вариационного ряда. Проверка гипотезы о выполнении закона нормального распределения выборки проводилась с помощью χ^2 — критерия Пирсона для 5%-го уровня значимости при $s=3$ степенях свободы, где s — число интервалов, по формуле:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^s (n_i - n'_i)^2}{n'_i} \quad (1)$$

где n_i — количество чисел, сгенерированных в i -м интервале,

n'_i — количество чисел в i -м интервале, вычисленное в соответствии с законом нормального распределения по формуле

$$n'_i = n\delta f(x_i), \quad (2)$$

n — объём выборки,

δ — размер интервала,

x_i — координата середины i -го интервала,

$f(x_i)$ — дифференциальная функция распределения для нормированного нормального закона с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратичным отклонением, равным единице,

$$f(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x_i^2}{2}} \quad (3)$$

На основании проведённых расчётов сделан вывод, что рассмотренные методы обеспечивают получение адекватных выборок. Наименьшее значение χ^2 -критерия Пирсона показал метод полярных координат Бокса-Мюллера-Марсальи.

Различные способы генерирования нормально распределённых случайных чисел широко применяются на практике. Близкая ситуация наблюдается для многих других часто используемых распределений, описание которых можно найти в литературе. В настоящей работе предлагается алгоритм, который не привязан к конкретной функции распределения. Актуальность создания подобного алгоритма обусловлена наличием круга задач в прикладной математической статистике в случае обращения к нестандартным и многофакторным функциям распределения.

2.2. Алгоритм генерирования случайных чисел для произвольной функции распределения

Пусть требуется создать выборку из непрерывных случайных чисел, подчиняющихся интегральной функции распределения $F(x)$. Алгоритм генерирования псевдослучайных чисел представим в виде следующих этапов.

На первом этапе необходимо определиться с интервалом изменения функции $F(x)$. В теоретических исследованиях он зачастую охватывает множество всех действительных чисел. При решении прикладных задач обычно используют конечные интервалы. Например, в случае нормального закона распределения часто ограничиваются отрезками $[M(x)-3\sigma, M(x)+3\sigma]$ или $[M(x)-4\sigma, M(x)+4\sigma]$, где $M(x)$ — математическое ожидание, σ — среднее квадратичное отклонение. Все расчёты в дальнейшем будут проводиться для случая генерирования чисел на конечном отрезке $[a,b]$. В качестве базового источника случайных чисел выбран генератор целых случайных чисел с равномерным распределением на отрезке $[0, N]$.

На втором этапе требуется подготовить вспомогательный массив данных из трёх строк и $N+1$ столбцов (см. табл. 1). Первая строка содержит целые числа, часть которых используется для формирования выборки из t чисел в соответствии с равномерным распределением.

Во вторую строку помещаются значения чисел x_i с шагом $\delta=(b-a)/N$:

$$a_0=a, a_1=a+\delta, a_2=a+2\delta, \dots, a_N=b.$$

Третья строка заполняется значениями интегральной функции распределения $F(x)$ в точках $a_i=a+i\delta, i=0, 1, \dots, N$.

Таблица 1 - Вспомогательная таблица для генерирования случайных чисел

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.71.1>

| i | 0 | 1 | 2 | ... | N |
|--------|------------|----------------|-----------------|-----|-----------------|
| a_i | $a_0=a$ | $a_1=a+\delta$ | $a_2=a+2\delta$ | ... | $a_N=a+N\delta$ |
| $F(x)$ | $F(a_0=a)$ | $F(a_1)$ | $F(a_2)$ | ... | $F(a_N=b)$ |

Величина δ -интервала выбирается таким образом, чтобы разность значений $F(x)$ в соседних столбцах не превышала требуемой точности вычислений $\varepsilon: F(a_i)-F(a_{i-1})<\varepsilon$.

Интегральная функция $F(x)$ с изменением аргумента на заданном отрезке от a до b монотонно возрастает от 0 до 1. Поэтому требование к размеру интервала δ не является слишком жёстким. Тестовые испытания показали, что точность расчётов $F(x)$ на уровне $\varepsilon=10^{-4}$ при не слишком больших величинах дифференциальной функции распределения обеспечивается выбором значения $N \approx 10^4-10^5$. В случае необходимости получения меньшей погрешности следует отказаться от одинакового размера интервала и привязать его к скорости изменения $F(x)$.

На третьем этапе запускается генератор случайных m целых чисел $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$ в соответствии с равномерным их распределением на отрезке $[0, N]$. Вероятность того, что используемый генератор выдаст любое число k_s , которое меньше выборочного значения n_i , равна

$$P(k_s < n_i) = n_i/(N+1), i=1, 2, \dots, m.$$

Формирование выборки из m вещественных случайных чисел x в соответствии с функцией распределения $F(x)$ проводится следующим образом. В третьей строке таблицы 1 определяется j -й интервал, для которого вероятность $P(k_s < n_j)$ находится в пределах

$$F(a_j) \leq P(k_s < n_j) < F(a_{j+1}).$$

Найденному неравенству соответствует полуинтервал $[a_j, a_{j+1})$, где с точностью до $\varepsilon=1/(N+1)$ находится искомое случайное число, соответствующее функции распределения $F(x)$. Обозначим его значение через x_j , тем самым подчёркивая, что оно принадлежит j -му интервалу.

Используя линейную экстраполяцию, получим:

$$x_j = a_j + \delta [P(k_s < n_j) - F(a_j)] / [F(a_{j+1}) - F(a_j)]. \quad (4)$$

Формула (4) завершает преобразование одного целого числа n_j , полученного с помощью целочисленного генератора с равномерным распределением на отрезке $[0, N]$, в вещественное число x_j на отрезке $[a, b]$. Многократное её применение к случайным целым числам $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$ обеспечивает получение искомой выборки из m вещественных чисел $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$, которая подчиняется заданной интегральной функции распределения $F(x)$.

2.3. Разработка программы *Generator* и тестирование разработанного метода получения случайных чисел с заданной функцией распределения

Программа *Generator* реализована в среде алгоритмического языка *Phyton*. Структурно она состоит из шести блоков.

Блок 1 обеспечивает ввод формулы для расчёта значения интегральной функции распределения, объёма выборки и числа интервалов для получения интервального вариационного ряда. Интерфейс программы написан на *Tkinter*. На рисунке 1 представлен пример ввода исходной информации для генерирования выборки из 1000 случайных чисел на отрезке $[-5, 5]$ с нормальным распределением при математическом ожидании, равным 0, и среднеквадратичным отклонением, равным 1.

Ведите количество сгенерированных чисел: 1000

Ведите математическое ожидание: 0

Ведите среднее отклонение: 1

Ведите нижнюю границу выборки: -5

Ведите верхнюю границу выборки: 5

Ведите начальное число для генератора случайных чисел
(оставьте пустым для случайного):

Рисунок 1 - Пример ввода информации для генерирования случайных чисел с нормальным распределением в тестирующем эксперименте

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.71.2>

В блоке 2 программа распознаёт формулу, преобразуя её в формат, понятный компьютеру. Для этого используется функция *eval*, которая позволяет программе интерпретировать текст как код.

В блоке 3 генерируется m целых чисел $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$, равномерно распределенных в заданном диапазоне $[0, N]$. Эти числа используются для подстановки в формулу (4), которая обеспечивает генерирование числа в соответствии с заданной функцией распределения.

Блок 4 обеспечивает формирование выборки из случайных чисел, подчиняющихся интегральной функции распределения $F(x)$, и при необходимости строит интервальный вариационный ряд и гистограмму, определяет среднее выборочное значение, дисперсию, среднеквадратичное отклонение, и критерий Пирсона. В таблице 2 представлен интервальный вариационный ряд в случае генерирования случайных чисел с нормальным распределением с параметрами, приведёнными на рисунке 1.

Таблица 2 - Таблица сравнения наблюдаемых и теоретических частот

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.71.3>

| Интервал | Наблюдаемые | Теоретические |
|----------------|-------------|---------------|
| [-4,75, -2,61) | 7,00 | 6,04 |
| [-2,61, -1,90) | 26,00 | 28,03 |
| [-1,90, -1,19) | 87,00 | 93,35 |
| [-1,19, -0,47) | 194,00 | 197,76 |
| [-0,47, 0,24) | 287,00 | 266,60 |
| [0,24, 0,95) | 222,00 | 228,78 |
| [0,95, 1,66) | 121,00 | 124,96 |
| [1,66, 2,38) | 47,00 | 43,42 |
| [2,38, 3,09) | 9,00 | 9,59 |

Примечание: вычисленное значение критерия Пирсона: 3,0; критическое значение критерия Пирсона: 19,7

Графическая интерпретация полученной выборки в виде гистограммы осуществляется в блоке 5 с помощью библиотеки *matplotlib*. Пример гистограммы, соответствующий интервальному вариационному ряду с параметрами, приведёнными в таблице 2, представлен на рисунке 2.

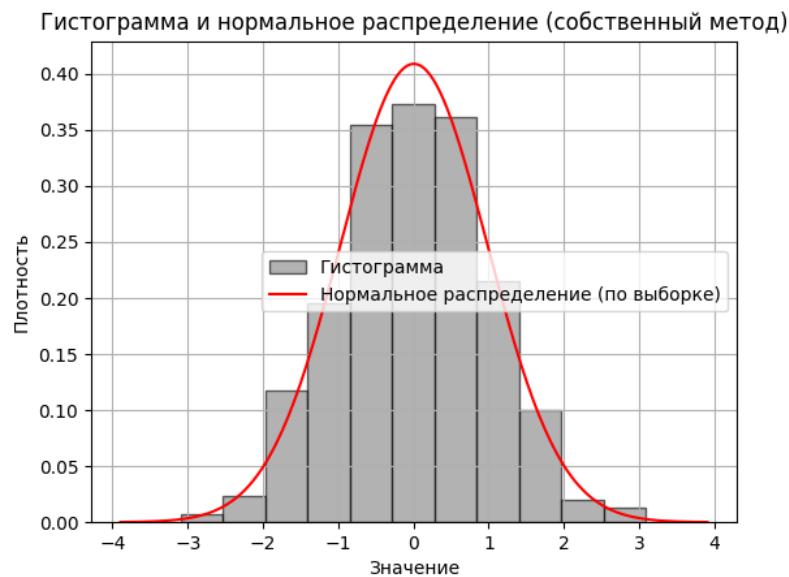


Рисунок 2 - Гистограмма для интервального вариационного ряда с параметрами, приведёнными в таблице 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.71.4>

Последний шестой блок обеспечивает вывод полной информации о параметрах сгенерированной выборки (среднее выборочное значение, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, критерий Пирсона).

Тестирование предлагаемого алгоритма генерирования случайных чисел проводилось на примерах нормального, показательного и синусоидального распределений. Интегральная функция распределения для нормированного

нормального закона с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратичным отклонением, равным единице, имеет вид [11]:

$$F(x) = \left(1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right) / 2. \quad (5)$$

Случайные числа, подчиняющиеся распределению (5), вычислялись по формуле (4) с использованием разработанной программы на выборках с объёмом $n=1000$ в диапазоне случайных чисел [-5, 5], который содержит более 99,998% от всех случайных чисел, подчиняющихся формуле (5) [11]. Сгенерированная выборка представлялась в виде интервального вариационного ряда, приведённого в таблице 2. Количество интервалов вычислялось по формуле Стерджесса $s=1+3,322\log_{10}(1000)$ с последующим округлением до ближайшего большего нечётного числа, которое в данном случае равнялось 11.

Вычисленное среднее выборочное $x_{cp}=0,05$ и среднее выборочное отклонение $s_{cp}=1,02$ хорошо согласуются с математическим ожиданием $M(x)=0$ и средним квадратичным отклонением $\sigma=1$ для используемой интегральной функции распределения.

Проверка гипотезы о соответствии выборки нормальному закону проверялась с помощью χ^2 -критерия Пирсона (1). Плотность нормального распределения вычислялась по формуле (3) в точке x^{cp}_i , отвечающей координате середины i -го интервала. Значение χ^2 для выборок с различной стартовой точкой изменялся от 3,0 до 10,1, но всегда был меньше критической величины, которая для 8 степеней свободы при 5%-м уровне значимости равняется 15,5 [11]. Поэтому нулевая гипотеза о нормальности сгенерированной выборки принимается.

Дополнительные тестовые испытания проводились на примере показательного закона распределения с математическим ожиданием $M(x)=1$ и среднеквадратичным отклонением σ , равным 1,

$$F(x) = \begin{cases} 0, x < 0 \\ 1 - e^{-x}, x \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

и в случае синусоидального закона с математическим ожиданием $M(x)=\pi/2$ и среднеквадратичным отклонением σ , равным $\pi/2$:

$$F(x) = \begin{cases} 0, x < 0 \\ \frac{(1-\cos(x))}{2}, 0 \leq x \leq \pi \\ 1, x \geq \pi \end{cases} \quad (7)$$

Плотность показательного распределения определяется формулой

$$f(x) = \begin{cases} 0, x < 0 \\ e^{-x}, x \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Дифференциальная функция синусоидального закона имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} 0, x < 0 \\ \frac{\sin(x)}{2}, 0 \leq x \leq \pi \\ 0, x \geq \pi \end{cases} \quad (9)$$

При построении вспомогательных таблиц границы отрезка $[a, b]$ принимались равными: $a=0$, $b=12$ для показательного закона, обеспечивающего точность 10^{-5} , и $a=0$, $b=\pi$ – для синусоидального. Объём выборок в обоих случаях составлял 1000. На рисунках 3 и 4 представлены гистограммы для полученных выборок.

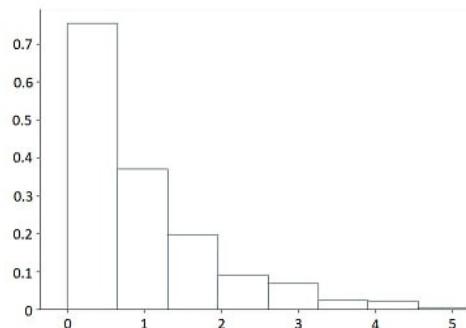


Рисунок 3 - Гистограмма для показательного закона распределения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.71.5>

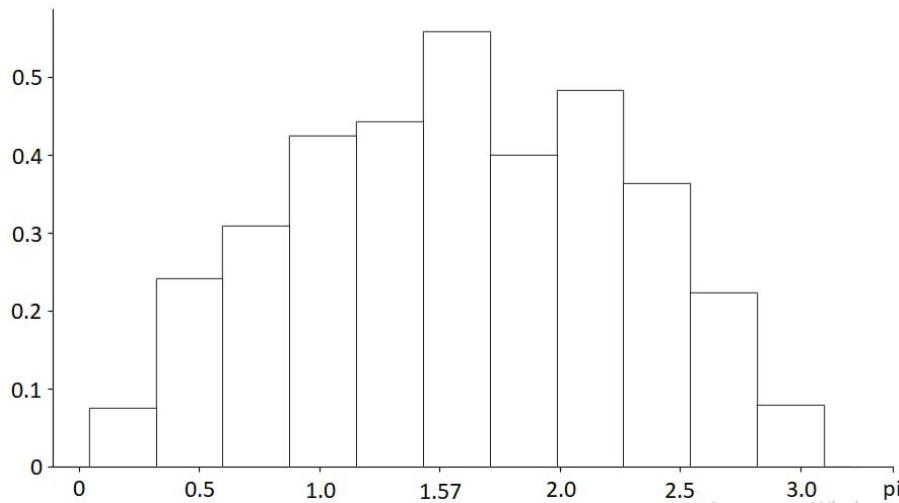


Рисунок 4 - Гистограмма в случае синусоидального закона распределения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.71.6>

Рассчитанные значения критерия Пирсона по формуле (1) оказались равными 10,65 в случае показательного закона и 12,28 в случае синусоидального. В обоих случаях вычисленные значения меньше критической величины, равной 15,5. Рассчитанные значения выборочных данных оказались равными:

- показательное распределение: выборочное среднее равно 0,99, средневыборочное отклонение равно 0,98;
- синусоидальное распределение: выборочное среднее равно 1,5.

Полученные выборочные параметры хорошо согласуются с математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями для соответствующих интегральных функций распределения. Поэтому можно говорить о том, что анализируемые выборки в данном случае также подчиняются заданным функциям распределения.

Обсуждение полученных данных

Тестовые испытания позволяют сделать вывод, что предлагаемый алгоритм обеспечивает генерирование адекватной выборки для произвольных интегральных функций распределения. Алгоритм метода может быть легко реализован на любом алгоритмическом языке при наличии генератора случайных целых чисел. Затрачиваемое машинное время в тестовых испытаниях для получения выборок с объёмом до 10^5 на обычных компьютерах средней мощности не превышает 30 секунд. Точность генерирования случайных величин определяется максимальным значением N , которое определяется используемым целочисленным генератором, и точностью вычисления интегральной функции распределения.

При необходимости генерирования случайных чисел в соответствии с наиболее часто используемыми распределениями (нормальное распределение, распределение Стьюдента и т.д.) можно воспользоваться стандартными функциями или программами, предлагаемыми в интернете, если они вызывают доверие. Предлагаемый алгоритм полезен в случае анализа процессов с неизвестными функциями распределения. Подобные случаи, например, встречаются при обработке результатов мониторинга территории ветровых электростанций (ВЭС) и прилегающих к ним зонам.

Рассмотрим следующий пример. Во многих странах оценка влияния ВЭС на орнитокомплексы проводится в соответствии с рекомендациями Шотландского фонда природного наследия [12]. Согласно этим рекомендациям, при организации мониторинговых мероприятий предлагается выделить несколько участков, где будут проводиться наблюдения за птицами. Полученная информация затем экстраполируется на всю территорию ВЭС.

Проведём анализ влияния общей площади выбранных участков на точность экстраполированных данных на примере ветрового парка «Приморск-1» [13]. Предположим, что выборочные данные подчиняются нормальному закону распределения. Площадь территории станции S примерно равна $10,1 \text{ км}^2$. Общая площадь участков наблюдения составляла около $s=2,59 \text{ км}^2$. Для генерирования случайных величин можно воспользоваться нашим методом или встроенной функцией на одном из алгоритмических языков [10].

Численность птиц, зарегистрированных на всём участке в 2017 году за $t=24$ дня наблюдения, составило 5923 особей всех видов или 247 птиц в расчёте на один день. Умножая приведённые данные на $S/s \approx 3,9$, найдём следующие экстраполированные значения: общая численность птиц на всей территории ветрового парка - 23097 особей, среднее значение в расчёте на один день – 963.

На первый взгляд может показаться, что полученные данные хорошо характеризуют истинное положение. В действительности, для более корректной экстраполяции необходимо учесть ряд обстоятельств, которые не укладываются в предположение о нормальности распределения. Например, общая площадь участков, где проводился учёт, состояла из трёх делянок, которые размещались в различных местах на территории ветрового парка с неравномерным распределением птиц, что в данном случае приведёт к более высокому значению дисперсии.

Оценка вклада неравномерности может быть проведена с использованием нестандартной интегральной функции распределения, которая учитывала бы направление полёта зарегистрированной птицы. Обсуждение других причин, связанных с невыполнением предположения о нормальности распределения, выходит за рамки тематики настоящей работы.

Заключение

В заключение отметим, что вся необходимая информация о динамике орнитокомплексов на территории ветровых парков Приморск-1, Пиморск-2 и Ботиевской ВЭС содержится в доступных отчётах, поэтому имеются все условия для проведения соответствующего статистического анализа с использованием разработанного метода.

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта № FRRS-2023-035 «Оценка состояния сезонных орнитологических комплексов и трансконтинентальных миграций на мониторинговых полигонах Азово-Черноморского региона и Сиваша, разработка программного обеспечения для моделирования и управления природными комплексами» Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out as part of project No. FRRS-2023-035 'Evaluation of the state of seasonal ornithological complexes and transcontinental migrations at monitoring sites in the Azov-Black Sea region and Sivash, development of software for modelling and managing natural complexes' of the State Task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- Горлов П.И. Анализ международного опыта изучения влияния ветровых электростанций на птиц / П.И. Горлов, В.Д. Сиохин // Биологический Вестник Мелитопольского государственного педагогического университета имени Богдана Хмельницкого. — Мелитополь, 2012. — № 1. — С. 37–47.
- Сиохин В.Д. Методы использования программного обеспечения для мониторинга сезонных орнитологических комплексов и оценки влияния ветровых станций / В.Д. Сиохин, П.И. Горлов, А.Б. Анненков // Сборник научных трудов Азово-Черноморской орнитологической станции. Мелитополь. — 2014. — № 17. — С. 161–167.
- Andryushchenko Yu.O. Current Status of Anserinae Wintering in Azov-Black Sea Region of Ukraine / Yu.O. Andryushchenko, V.S. Gavrilenko, V.A. Kostiushyn [et al.] // Bulletin of Zoology. — 2019. — № 53 (4). — P. 297–312.
- Siokhin V. Identification of "Primorsk-1" wind power plant impact on the ecological situation connected with the behavior of ornithofauna on the Azov Sea coast / V. Siokhin, V. Osadchy, V. Yeremieiev [et al.] / Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — P. 1–22.
- Кнут Д.Э. Искусство программирования. Полученные алгоритмы / Д.Э. Кнут. — Москва: Диалектика-Вильямс, 2018. — Т. 2. — 834 с.
- Зорин А.В. Моделирование случайных величин и проверка гипотез о виде распределения: Учебно-методическое пособие / А.В. Зорин, В.А. Зорин, М.А. Федоткин. — Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. — 19 с.
- Преобразование равномерно распределенной случайной величины в нормально распределенную. — 2014. — URL: <https://habr.com/ru/articles/208684/> (дата обращения: 11.03.2025).
- Петров Ю.В. Моделирование случайных величин / Ю.В. Петров, С.Н. Аникин, С.А. Юхно. — Санкт-Петербург, 2020. — 90 с.
- Гельгор А.Л. Методы моделирования случайных величин и случайных процессов: учеб. пособие / А.Л. Гельгор, А.И. Горлов, Е.А. Попов. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 217 с.
- Еремеев В.С. Анализ методов математического моделирования нормально распределенных случайных чисел / В.С. Еремеев, М.П. Чепурной / Университетская Наука. Вопросы науки, технологии, экономики, педагогики и права: теоретико-практический аспект. Сев.-Кавказский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — Минеральные Воды, 2023. — № 2 (16). — С. 138–143.
- Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика / Н. Ш. Кремер. — Москва: Юнити-Дана, 2004.—566 с.
- Recommended bird survey methods to inform impact assessment of onshore wind farms Scottish Natural Heritage. — 2017. — URL: <https://www.readkong.com/page/recommended-bird-survey-methods-to-inform-impact-assessment-6011344> (accessed: 11.03.2025).

Список литературы на английском языке / References in English

- Gorlov P.I. Analiz mezhdunarodnogo opyta izuchenija vlijanija vetrovyh jeklektrostancij na ptic [Analysis of international experience in studying the impact of wind farms on birds] / P.I. Gorlov, V.D. Siohin // Biologicheskij Vestnik Melitopol'skogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni Bogdana Hmel'nickogo [Biological Bulletin of Melitopol State Pedagogical University named after Bogdan Khmelnitsky]. — Melitopol, 2012. — № 1. — P. 37–47. [in Russian]
- Siohin V.D. Metody ispol'zovanija programmnogo obespechenija dlja monitoringa sezonnih ornitologicheskikh kompleksov i ocenki vlijanija vetrovyh stancij [Methods of using software to monitor seasonal ornithological complexes and

assess the impact of wind farms] / V.D. Siokin, P.I. Gorlov, A.B. Annenkov // Sbornik nauchnyh trudov Azovo-Chernomorskoy ornitologicheskoy stancii [Collection of scientific papers of the Azov-Black Sea Ornithological Station]. Melitopol. — 2014. — № 17. — P. 161–167. [in Russian]

3. Andryushchenko Yu.O. Current Status of Anserinae Wintering in Azov-Black Sea Region of Ukraine / Yu.O. Andryushchenko, V.S. Gavrilenco, V.A. Kostyushyn [et al.] // Bulletin of Zoology. — 2019. — № 53 (4). — P. 297–312.

4. Siokhin V. Identification of “Primorsk-1” wind power plant impact on the ecological situation connected with the behavior of ornithofauna on the Azov Sea coast / V. Siokhin, V. Osadchy, V. Yeremieiev [et al.] / Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — P. 1–22.

5. Knut D.E. Iskusstvo programmirovaniya. Poluchennye algoritmy [The Art of Programming. The obtained algorithms] / D.E. Knut. — Moscow: Dialectics-Williams, 2018. — Vol. 2. — 834 p. [in Russian]

6. Zorin A.V. Modelirovanie sluchajnyh velichin i proverka gipotez o vide raspredelenija: Uchebno-metodicheskoe posobie [Modelling random variables and testing hypotheses about distribution types: Study guide] / A.V. Zorin, V.A. Zorin, M.A. Fedotkin. — Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2017. — 19 p. [in Russian]

7. Preobrazovanie ravnomerno raspredelennoj sluchajnoj velichiny v normal'no raspredelennuju [Transformation of a uniformly distributed random variable into a normally distributed one]. — 2014. — URL: <https://habr.com/ru/articles/208684/> (accessed: 11.03.2025). [in Russian]

8. Petrov Ju.V. Modelirovanie sluchajnyh velichin [Modelling random variables] / Ju.V. Petrov, S.N. Anikin, S.A. Juhno. — St.Petersburg, 2020. — 90 p. [in Russian]

9. Gel'gor A.L. Metody modelirovaniya sluchajnyh velichin i sluchajnyh processov: ucheb. posobie [Methods for modelling random variables and random processes: textbook] / A.L. Gel'gor, A.I. Gorlov, E.A. Popov. — Saint Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2012. — 217 p. [in Russian]

10. Eremeev V.S. Analiz metodov matematicheskogo modelirovaniya normal'no raspredeljonyh sluchajnyh chisel [Analysis of methods for mathematical modelling of normally distributed random numbers] / V.S. Eremeev, M.P. Chepurnoj / Universitetskaja Nauka. Voprosy nauki, tehnologii, jekonomiki, pedagogiki i prava: teoretyko-prakticheskij aspekt. Sev.-Kavkazskij filial Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [University Science. Issues of science, technology, economics, pedagogy and law: theoretical and practical aspects. North Caucasus Branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. — Mineralnye Vody, 2023. — № 2 (16). — P. 138–143. [in Russian]

11. Kremer N.Sh. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaja statistika [Probability theory and mathematical statistics] / N. Sh. Kremer. — Moscow: Unity-Dana, 2004. — 566 p. [in Russian]

12. Recommended bird survey methods to inform impact assessment of onshore wind farms Scottish Natural Heritage. — 2017. — URL: <https://www.readkong.com/page/recommended-bird-survey-methods-to-inform-impact-assessment-6011344> (accessed: 11.03.2025).