

# Оценка числа столкновений птиц с турбинами на территории Ботиевской ветровой электростанции (Запорожская область) с использованием математической модели

**Сиохин В. Д.<sup>1</sup>, Еремеев В. С.<sup>2</sup>, Окулова Е. А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр «Биоразнообразие-экоресурс и мониторинг» Мелитопольского государственного университета  
Мелитополь, Россия

<sup>2</sup> Мелитопольский государственный университет  
Мелитополь, Россия  
Siokhinvd@gmail.com, elenaokulova1987@yandex.ru, evs1938@gmail.com

В данной работе представлен количественный анализ риска столкновения мигрирующих птиц с лопастями турбин ветровой электростанции (ВЭС) на территории Ботиевского ветропарка. Учитывая, что данная территория является важным перекрестком для многочисленных популяций перелетных птиц, задача оценки потенциального воздействия ВЭС на орнитофауну представляет особую актуальность. Анализ основывается на данных, полученных в результате мониторинга функционирования Ботиевской ВЭС в период с 2013 по 2021 год. В процессе исследования были использованы известные математические модели, адаптированные для условий эксплуатации ВЭС и учитывающие особенности миграционных путей птиц, характеристики турбин и метеорологические факторы. Результаты проведенного мониторинга позволили выявить зоны риска столкновений птиц с вращающимися лопастями, расположенные на высоте от 50 до 150 метров. За указанный период времени в этих зонах было зафиксировано 543 особи различных видов птиц, в основном грачей, обыкновенных чаек, чаек хохотуний, обыкновенных канюков. Учтено несколько видов редких птиц с единичной численностью (гусь серый, кобчик, кроншнеп большой). Важно отметить, что это число составляет менее 1 % от общей численности зарегистрированных видов птиц. Анализ показал, что пролеты птиц через зону риска наблюдались только в весенний и осенний миграционные периоды и были отмечены лишь в четырех из девяти лет эксплуатации ВЭС (2014, 2017, 2019 и 2020 гг.). В рамках исследования была проведена оценка средней вероятности столкновения одной птицы с турбиной в случае ее пролета через зону вращения лопастей, которая составила около  $0,16 \pm 0,02$ . На основе полученных данных было рассчитано максимально возможное число столкновений за весь период эксплуатации станции, которое приблизительно равняется 4,1 случая. При этом 1,9 столкновений приходятся на весенний миграционный период, а 2,2 – на осенний. Среднегодовое число столкновений оценивается в 0,46, что находится в хорошем соответствии с данными, опубликованными в научной литературе для ВЭС аналогичной мощности. Данное исследование проводилось в весенний и осенний периоды с участием 65 турбин. В целом, представленные результаты свидетельствуют о незначительном воздействии турбин Ботиевского ветропарка на орнитокомплексы, исследуемой территории и в прилегающих буферных зонах. Полученные данные могут быть использованы для оценки экологического риска других ветроэнергетических проектов и разработки стратегий по снижению негативного влияния ВЭС на мигрирующих птиц.

**Ключевые слова:** ветровые электростанции, орнитокомплексы, птицы, столкновения птиц с турбинами.

## ВВЕДЕНИЕ

Ботиевская ветровая электростанция (ВЭС) расположена в Запорожской области на побережье Азовского моря, которое характеризуется местом пролетных путей многочисленных популяций мигрирующих птиц в масштабах Евразии (Gorlov, 2016; Черничко, 2016), поэтому изучение возможности их взаимодействия с турбинами имеет большой интерес. Для решения подобных задач во многих публикациях (Band, 2012; Jervis, 2017; Morinha, 2017; Osadchy, 2019) применялась математическая модель, основанная на использовании формулы:

$$n_{\text{столкн.}} = n_{\text{прол.}} fp \quad (1)$$

где:  $n_{\text{прол}}$  – число птиц, пролетающих через ветровое колесо;  
 $p$  – вероятность столкновения одной птицы с лопастями;  
 $f$  – коэффициент уклонения птицы при подлёте к ветровому колесу.

Формула (1) позволяет с удовлетворительной точностью оценивать возможность взаимодействия птиц с турбинами.

Цель настоящего исследования – оценить число столкновений птиц с ветровыми колёсами Ботиевской ВЭС (Запорожская область) с использованием математической модели.

Задачи исследования:

- адаптировать математическую модель столкновения (Osadchy, 2019) к условиям эксплуатации Ботиевской ВЭС;
- определить численность птиц и время их пребывания в опасной зоне столкновения с турбинами на основании результатов мониторинга территории Ботиевского ветропарка;
- оценить количество столкновений птиц с турбинами ВЭС в период её эксплуатации в 2013–2021 годы.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Ежегодные исследования весенних и осенних миграций птиц проводились с использованием методик зарубежных ученых (Scottish Natural Heritage, 2017), некоторые из которых были адаптированы к авторскому программному обеспечению (Siokhin et al., 2021). Учет птиц осуществлялся на трансектах по заранее утвержденным маршрутам с учетной полосой в 150 м с обеих сторон. Площадь трансекта составляла около 40 % территории площадки ВЭС. Кроме этого исследования осуществлялись на 5 стационарных пунктах наблюдений с видимостью в радиусе поля до 1,5 км, которые относительно равномерно располагались на территории ветропарка с учетом особенностей ландшафтных характеристик. Наблюдения на пунктах наблюдений проводились по два часа в утренние и вечерние часы. Весенний период включал 4 дня наблюдений, а осенний – 6 дней. Результаты наблюдений были оформлены в автоматизированную авторскую базу данных.

Для расчёта вероятности столкновения одной птицы с одной лопастью использована формула (Band, 2012):

$$P = \frac{\iint p_j(r, \varphi) r dr d\varphi}{\pi R_v^2}, \quad (2)$$

где:  $p_j(r, \varphi)$  – плотность вероятности столкновения птицы с лопастью турбины;  
 $R_v$  – радиус ветрового колеса.

Интегрирование в формуле (1) производится по всей поверхности ветроколеса. Накопленные к настоящему времени данные позволяют сделать вывод, что основная погрешность выражений (1), (2) связана с возможностью уклонения птиц от встречи с турбиной. Коэффициент уклонения  $f$  для различных ситуаций изменяется в широких пределах от 0,005 до 0,05 (May, 2010; Furness, 2015). В настоящей работе расчёты проводились для наиболее неблагоприятных условий с максимально возможным значением коэффициента, равным:

$$f = 0,05 \quad (3)$$

В работе (Osadchy, 2019) при вычислении вероятности столкновения вместо точного интеграла (2) предложено простое алгебраическое выражение:

$$p = \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 + n_0(R - R_0) \frac{2l/\pi + d \cos \gamma + (R - R_0)(d \sin \gamma + L)\omega / 2v}{\pi R^2}, \quad (4)$$

где:  $L$  – длина птицы;  
 $v$  – скорость полёта птицы;  
 $l$  – размах крыльев птицы;  
 $n_0$  – количество лопастей;  
 $R_0$  – радиус втулки, на которой крепятся лопасти;  
 $R$  – длина лопасти ветрогенератора;  
 $d$  – среднее значение ширины лопасти;  
 $\gamma$  – угол установки лопасти (угол между хордой сечения лопасти и плоскостью ветроколеса);  
 $\omega$  – угловая скорость вращения лопастей.

Формулы 1–4 являются общей математической моделью, позволяющей оценить количество столкновений птиц с турбинами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Интенсивность полёта птиц в зоне риска их столкновений с турбинами Ботиевской ВЭС.** Для оценивания риска взаимодействия птиц с турбинами будем использовать следующие полезные понятия, предложенные специалистами научно-исследовательского центра Scottish Natural Heritage (Scottish Natural Heritage, 2017): зона риска ЗР, характеризующая размер пространства между нижней и верхней кромок ветрового колеса, опасная зона ОЗ, относящаяся к объёму, занимаемому всеми ветровыми колёсами и интенсивность полёта  $I$  в зоне риска. Обозначим расстояния верхней и нижней кромок ветрового колеса от земли  $H_{max}$  и  $H_{min}$ . Объём зоны риска столкновений  $V_{risk}$  определяется произведением площади территории ВЭС, равной  $S$ , на разность высот  $\delta H = H_{max} - H_{min}$ , то есть  $V_{risk} = S\delta H$ . Размер опасной зоны совпадает с объёмом пространства  $V_{OZ}$ , занимаемого всеми  $M$  ветровыми колёсами ветропарка. Он равен  $V_{OZ} = M\pi R^2 dsin(\gamma)$ , где  $R$  – радиус лопасти,  $d$  – её ширина,  $\gamma$  – угол наклона лопасти к плоскости ветрового колеса.

Под интенсивностью полётов  $I$  понимается сумма произведений количества  $i$ -х групп птиц  $n_i$ , зафиксированных в ЗР на участке наблюдения с площадью  $S$  за время учёта  $T$ , на время их пребывания  $t_i$  в этой зоне. Следовательно, интенсивность полёта равна:

$$I = \sum n_i t_i \quad (5)$$

Среднее количество птиц  $n$ , которое характеризует усреднённое их количество, постоянно присутствующих на участке наблюдений равно  $n = I/T$ . Мониторинговая часть площадок учёта орнитокомплексов охватывала примерно 70 % общей территории Ботиевской ВЭС и прилегающих буферных зон. Оценивая соотношение между размерами площадей самого ветрового парка и буферных зон в конкретном случае, можно считать, что размеры участков наблюдений  $s$  и территории самого ветрового парка в первом приближении соизмеримы и равны  $S \approx 15 \text{ км}^2$ . Поэтому в дальнейшем среднее количество птиц  $n$ , которое находится на территории ВЭС, будем принимать равным  $n = I/T$ , что с учётом формулы (5) даёт

$$n = \sum n_i t_i / T \quad (6)$$

Линейный размер площади, занимаемой ветропарком, оценивается величиной  $\sqrt{S}$ , а среднее расстояние, которое пролетает птица через его территорию, значением  $(\sqrt{S})/2$ . Время пролёта птиц  $t_i$  через ЗР со скоростью  $v$  равно  $(\sqrt{S})/2v$ . Следовательно, количество птиц в ЗР ветропарка  $n_{ZR}$  равно  $n(\sqrt{S})/2v$  и согласно формуле (6) определяется выражением

$$n_{3P} = \sum n_i \sqrt{S/(2vT)} \quad (7)$$

Результаты мониторинга ВЭС и буферных зон показали, что 99,16 % от общего количества птиц приходилось на высотах вне ЗР столкновения с турбинами. В ЗР на высотах от 50 до 150 м зафиксировано 543 птицы. Все они пролетали в весенний и осенний миграционный периоды только в 2014, 2017, 2019 и 2020 годы.

Информация о численности птиц ( $N$ ) в зоне риска в различные сезоны, длительность учётных мероприятий ( $T$ ) и длительность миграционного периода ( $\tau$ ) приведены в таблице 1. Поскольку размеры участков наблюдения и площадь ВЭС примерно одинаковы, то данные таблицы 1 в равной степени относятся как к участкам наблюдения, так и к территории ВЭС с площадью  $S=15 \text{ км}^2$ .

*Таблица 1*

Численность птиц, зарегистрированных в зоне риска столкновения с лопастями ВЭС за время наблюдений

Сезон	Годы											
	2014			2017			2019			2020		
	$N$	$T$	$\tau$									
Весна	135	9	45	72	4	45	45	4	46	33	4	45
Осень	258	7	7	-				-			-	

Примечание к таблице.  $N$  – численность птиц;  $T$  – дни;  $\tau$  – длительность миграционного периода (дни).

Численность птиц, учтённых осенью в 2014 году в ЗР, составила 258 особей. Больше всего в этот период пролетело грачей (*Corvus frugilegus*) – 80 птиц. В весенний период наибольшие показатели относятся к следующим видам: озерная чайка (*Larus ridibundus*) – 45 особей в 2017 году, хохотунья (*Larus cachinnans*) – 14 особей в 2020 году и канюк (*Buteo buteo*) – 11 особей в 2020 году. В небольших количествах отмечены грач, пустельга обыкновенная (*Falco tinnunculus*), ворон (*Corvus corax*) и некоторые другие виды. Всего в весенние периоды 2013–2020 годов учтено 285 птиц (0,94 % от общего количества).

**Адаптирование математической модели повреждаемости птиц к условиям эксплуатации Ботиевского ветропарка.** Среднее количество птиц ( $n_{mup\bar{o}}$ ) в опасной зоне (ОЗ), определяемой объёмом пространства, которое занято ветровыми колёсами, определяется численности птиц ( $n_{3P}$ ) в ЗР в соответствие с формулой (7), умноженной на коэффициент  $V_{mup\bar{o}}/V_{Pusk}$ :

$$n_{mup\bar{o}} = \sum n_i V_{OZ} \sqrt{S/(2vT_{y\ddot{e}t} V_{Pusk})} \quad (8)$$

Обозначим через  $t$  среднее время пролёта одной птицы через ЗР, занимаемое одним ветровым колесом. За время эксплуатации ВЭС в течение  $T_{\text{экспл}}$  через ОЗ пролетит  $n_{\text{прол}}=n_{mup\bar{o}} T_{\text{экспл}}/t$  птиц. Все они, зафиксированные в ЗР, наблюдались в весенний и осенний миграционные периоды, поэтому в этой и последующей формулах величина  $T_{\text{экспл}}$  принимается равной значению  $T_{\text{мигр}}$ , приведённой в таблице 1, что с учётом (8) позволяет записать:

$$n_{\text{прол}} = \sum n_i V_{OZ} T_{\text{мигр}} \sqrt{S/(2vT_{y\ddot{e}t} V_{Pusk} t)} \quad (9)$$

Рассмотрим случай подлёта птицы к турбине параллельно её оси. Время пролёта такой птицы с длиной  $L$  через одно ветровое колесо равно  $t=(dsin(\gamma)+L)/v$ . Подставляя значение  $t$ , объём ОЗ, равный  $V_{OZ}=M\pi R^2 dsin(\gamma)$ , и объём ЗР, равный  $V_{Pusk}=S\delta H$ , в формулу (9), получим формулу для вычисления количества птиц, пролетающих через ветровые колёса ВЭС за время её эксплуатации:

$$n_{\text{пред}} = \sum n_i M \pi R^2 T_{\text{мизр}} / [2 T_{\text{учём}} \delta H \sqrt{S} (1 + L/d \sin(\gamma))] \quad (10)$$

Длина птиц, зафиксированных на территории Ботиевской ВЭС, составляет около 0,3–0,5 м, средняя ширина лопасти ветрового колеса примерно равна 4 м, угол  $\gamma=30^\circ$ . Следовательно, величина  $L/d \sin(\gamma)$  в формуле (10) оценивается величиной около 0,2. Принимая во внимание, что ошибка получаемых расчётов, связанная с выбором коэффициента уклона (3) и точностью определения коэффициента интенсивности полёта I намного больше указанного значения 0,2, множитель  $(1+L/d \sin(\gamma))$  в формуле (10) можно приравнять единице и выражение (10) записать в виде:

$$n_{\text{пред}} = \sum n_i M \pi R^2 T_{\text{мизр}} / (2 T_{\text{учём}} \delta H \sqrt{S}) \quad (11)$$

Особенность выражения (11) состоит в том, что оно не содержит каких-либо характеристик птиц.

Формулы (1), (3), (4) и (11) позволяют вычислить вероятность столкновения одной птицы и общее количество столкновений птиц рассматриваемого вида с турбинами в течение заданного промежутка времени эксплуатации ВЭС.

**Определение числа столкновений птиц с турбинами.** На первом этапе оценим вероятность столкновения птицы с лопастями ветрового колеса с использованием формулы (4), которая содержит три характеристики птицы ( $l$ ,  $L$ ,  $v$ ) и семь параметров турбины ( $M$ ,  $n_0$ ,  $R_0$ ,  $R$ ,  $d$ ,  $\gamma$ ,  $\omega$ ). При проведении расчётов значения параметров для ветровых установок принималась равными:

$M=65$  – число турбин на ВЭС;

$n_0=3$  – число лопастей в ветровом колесе;

$R_0 = 3$  м – радиус втулки, на которой крепятся лопасти;

$R = 67$  м – длина лопасти ветрогенератора;

$d = 4$  м – среднее значение ширины лопасти;

$\gamma = 30^\circ$  – угол установки лопасти;

$\omega=0,233$  оборота в секунду – максимальная угловая скорость ветроколеса.

Вероятности столкновения птиц с турбинами, вычисленные по формуле (4) и необходимые для расчётов параметры птиц (длина, размах крыльев её скорость), представлены в таблице 2.

Результаты мониторинга орнитокомплексов на территории Ботиевского ветрового парка и двух ветровых примыкающих к нему ветровых станций «Приморск-1» и «Приморск-2» показали, что в ЗР могут находиться представители небольшого числа видов. Характеристики некоторых из них и вероятности столкновения птиц с турбинами  $p$ , вычисленные по формуле (4), представлены в таблице 2. Рассчитанные значения вероятности получены для одной

Таблица 2  
Основные параметры птиц и рассчитанные вероятности их столкновения с турбинами

Вид птицы	$L$ , м	$l$ , м	$v$ , м/сек	$p$
Ворон	0,62	1,45	12,50	0,18
Грач	0,45	0,90	13,00	0,18
Озерная чайка	0,35	1,00	13,00	0,17
Хохотунья	0,60	1,40	13,00	0,19
Канюк	0,55	1,2	11,50	0,13
Болотный дунь	0,55	1,25	18,10	0,15
Обыкновенная пустельга	0,35	0,70	18,00	0,14
Щурка золотистая	0,30	0,45	18,00	0,14

Примечание к таблице.  $L$  – длина,  $l$  – размах крыльев,  $v$  – скорость,  $p$  – вероятности столкновения птиц с турбинами.

птицы, которая, подлетая к турбине перпендикулярно к плоскости, где находится ветровое колесо, не изменяет траектории полёта.

Среднее значение вероятности столкновения, вычисленное по данным таблицы 3, составляет около 0,16, среднеквадратическое отклонение равно 0,02. Несмотря на различие характеристик птиц по своим размерам и скорости полётов вероятности их столкновения с лопастями турбин изменяются в относительно небольшом диапазоне, поэтому в дальнейшем в расчётах значение  $p$  принималось равным 0,16. Вычисление количества столкновений в различные сезоны проводились по формуле (1). Коэффициент уклонений полагался равным максимальному значению 0,05. Число пролетающих птиц через ветровые колёса определялось по формуле (11). Численные значения параметров приведены ранее. В частности, принималось, что площадь ветрового парка равнялась  $S=15 \text{ км}^2$ , высотный размер зоны риска  $\delta H=134 \text{ м}$ .

Вычисленное количество возможных столкновений приходится на осенний миграционный период в 2014 году ( $n_{\text{столкн.}}=2,2$ ). Число столкновений в весенний сезон было заметно меньше и составило 0,51 в 2014 году, 0,70 в 2017 году, 0,4 в 2019 году и 0,9 в 2020 году. Общее количество за весь весенний сезон оценивается в 1,9, а за анализируемый четырёхлетний период эксплуатации с учётом осенней миграции ветрового парка величиной 4,1. Следовательно, среднее ожидаемое значение числа столкновений, приходящееся на один год в период девятилетней эксплуатации Ботиевской ВЭС, примерно равно 0,46.

Результаты расчётов взаимодействия птиц с турбинами зависят от точности определения трёх основных параметров в используемой математической модели (1): количества птиц  $n_{\text{прол.}}$ , пролетающих в ОЗ, коэффициента уклонения  $f$  и вероятности столкновения  $p$  одной птицы с лопастями ветрового колеса.

Неточность величины  $n_{\text{прол.}}$  зависит, главным образом, от неточности задания интенсивности полётов птиц (5), то есть, в конечном счёте, от определения численности учтённых птиц в ЗР. Более сложная ситуация связана с выбором коэффициента уклонения, который находится в пределах от 0,005 до 0,05. В данной работе его величина принята равной 0,05. Подобный выбор коэффициента позволяет утверждать, что рассчитанные значения столкновений характеризуют верхнюю максимальную границу для действительной величины ( $n_{\text{столкн.}}$ ).

Наибольшая достоверность относится к оценке вероятности столкновения  $p$ , что связано со спецификой условия эксплуатации Ботиевской ВЭС. Её турбины расположены на высоте более 50 метров. Полеты на больших высотах характерны для крупных видов. Из таблицы 2 видно, что величина  $p$  для тех видов, которые зафиксированы в ЗР, находится в узком диапазоне  $1,6 \pm 0,2$ .

Представляется интересным сравнить расчётные данные с прогностическими оценками взаимодействия птиц с турбинами на территории ВЭС «Приморск-1» в Приазовском регионе, где для представителей таких видов как канюк, болотный лунь, озерная чайка, золотистая щурка получены несколько большие значения, лежащие в интервале от 0,7 до 3,4 в расчёте на один год эксплуатации ветрового парка работе (Osadchy, 2019).

Проведение орнитологической экспертизы во многих странах является обязательным условием для принятия решения о строительстве ВЭС. Тем не менее, иногда решение принимается при отсутствии информации по многим вопросам, что исключает возможность использования математической модели. В этом случае ориентируются на статистический материал, накопленный в ряде стран по определению повреждаемости птиц. В работе (Chylarecki, 2011) содержатся данные о смертности птиц на 109 ветряных электростанциях в Европе и Северной Америке. Авторы этого исследования пришли к выводу, что среднее количество погибших птиц составляет около 0,5–1,0 на одну ВЭС в течение одного года эксплуатации, что примерно соответствует результатам нашего анализа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена количественному анализу риска столкновения птиц с ветровыми турбинами на территории Ботиевского ветропарка (ВЭС) в период с 2013 по 2021 год. Исследование направлено на оценку экологического воздействия ВЭС на орнитофауну, учитывая тот факт, что Ботиевский ветропарк расположен в регионе, который является важным пролетным путем для многочисленных видов перелетных птиц. В процессе анализа была применена математическая модель, адаптированная к специфическим условиям функционирования ВЭС, включая характеристики турбин, метеорологические факторы и данные мониторинга миграции птиц.

Результаты, полученные в ходе исследования, показывают, что максимально возможное количество столкновений птиц с лопастями турбин за весь период эксплуатации ВЭС не превышает примерно четырех особей. Анализ видового состава птиц, подверженных риску столкновения, выявил преобладание таких видов, как грачи, обыкновенные чайки, хохотуны, обыкновенные канюки, а также более редких видов птиц. Важно отметить, что все зафиксированные случаи предполагаемых столкновений приходятся исключительно на весенний и осенний периоды миграции птиц.

На основе полученных количественных данных сделан вывод о незначительном влиянии работы ветряных турбин на орнитокомплексы, обитающие на территории Ботиевского ветропарка и в прилегающих к нему буферных зонах. Полученные результаты могут быть использованы для оценки экологического риска других ветроэнергетических проектов и разработки мер по минимизации негативного воздействия ВЭС на мигрирующую орнитофауну. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение математической модели, расширение масштабов мониторинга и учёт дополнительных факторов, влияющих на вероятность столкновений.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 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».*

## Список литературы

- Черничко И. И. Значение Азово-Черноморского побережья Украины в поддержании структуры внутриматериковых пролетных путей куликов в Восточной Европе // Вестник зоологии. Монографическая серия. – 2016 – Вып. 33 (2) – С. 120.
- Band B. Using a Collision Risk Model to Assess Bird Collision Risks for Offshore Wind Farms: Report by British Trust for Ornithology (BTO): Report for The Crown Estate. – 2012. – P. 62.
- Chylarecki P., Kajzer K., Polakowski M., Wysocki D., Tryjanowski P., Wuczyński A. Wytyczne dotyczące ocen oddziaływańia elektrowni wiatrowych na ptaki. – Warszawa: Generalna Dyrekcyja Ochrony Środowiska, 2011. – 129 p.
- Furness R. W. A review of red-throated diver and great skua avoidance rates at onshore wind farms in Scotland // Scottish Natural Heritage Commissioned Report, 2015. – N 885. – P. 25.
- Gorlov P. I., Siokhin V. D., Matsyura F. V. Assessment of potential threats of wind farms for migratory birds in the South of Ukraine. – Biological Bulletin of Bogdan Chmelnitskiy Melitopol State Pedagogical University. – 2016. – Т. 6, N 3. – P. 175–186.
- Jervis L., McGovern S., Sweeney S., Buisson R. Offshore Ornithology – Collision Risk Modelling Report, 4, Annex 4-2. – London: Vattenfall Wind Power Ltd, 2017. – P. 24.
- May R. P. L. Hoel P., Langston R., Dahl E., Bevanger K., Reitan O. Collision risk in white-tailed eagles. Modelling collision risk using vantage point observations in Smøla wind-power plant // NINA Report. – 2010. – N 639. – P. 29.
- Morinha F., Travassos P., Seixas F., Martins A., Bastos R., Carvalho D. Differential mortality of birds killed at wind farms in Northern Portugal // Bird Study. – 2014. – Т. 61, N 2. – P. 255–259.
- Osadchy V., Siokhin V., Gorlov P., Yeremieev V., Gorlov P., Osadcha K. Development of the information system for forecasting collision between birds and wind arms // Ukrainian Journal of Educational Studies and Information Technology. – 2019. – Т. 7, N 4. – P. 10–23.
- Recommended bird survey methods to inform impact assessment of onshore wind farms. – Scottish Natural Heritage, 2017. – P. 37.

Scottish Natural Heritage / Recommended bird survey methods to inform impact assessment of onshore wind farms March. 2017. Retrieved from. <https://www.readkong.com/page/recommended-bird-survey-methods-to-inform-impact-assessment-6011344> (просмотрено 19.06.2024)

Siokhin V. D., Osadchy V., Gorlov P., Yeremeev V. S. Identification of “Primorsk-1” wind power plant impact on the ecological situation connected with the behavior of ornithofauna on the Azov Sea coast // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 121.

**Siokhin V. D., Yeremeev V. S., Okulova E. A. Quantitative Assessment of Bird-Turbine Collisions at the Botiyevo Wind Farm Using a Mathematical Model (Zaporizhzhya Region) // Ekosistemy. 2025. Iss. 43. P. 104–111.**

This paper presents a quantitative analysis of collision risk for migratory birds with wind turbine blades at wind farm (WF) on the territory of the Botiyevo and adjacent areas. Considering that this territory is an important crossroads for numerous populations of migratory birds, the task of assessing the potential impact of the WF on the avifauna is of particular relevance. The analysis is based on data obtained from monitoring the operation of the Botiyevo Wind Farm from 2013 to 2021. The study used well-known mathematical models adapted to the operating conditions of the WF and taking into account the features of bird migration routes, turbine characteristics and meteorological factors. The monitoring results facilitated the identification of risk zones for avian collisions with rotating blades, ranging in altitude from 50 to 150 meters. During the specified period, a total of 543 individual birds representing various species were recorded within these zones. The majority comprised rooks, common gulls, laughing gulls, and common buzzards, along with several rarer species. Several rare species were also observed individually, including grey geese, hobbies, and great curlews. It is important to note that this number represents less than 1% of the total recorded bird species in the area. The analysis revealed that bird flights through the risk zone occurred only during the spring and autumn migration periods and were registered in only four out of nine years of wind farm operation (2014, 2017, 2019 and 2020). The average probability of one bird colliding with a turbine upon passing through the blade rotation zone was estimated at approximately  $0.16 \pm 0.02$ . Based on the data obtained, the maximum possible number of collisions for the entire period of operation of the WF was calculated, which was approximately equal to 4.1 cases. At the same time, 1.9 collisions occur during the spring migration period, and 2.2 during the autumn migration period. The annual average number of collisions is estimated at 0.46, which aligns well with literature values reported for wind farms of similar capacity. This research involved monitoring conducted during both spring and autumn periods across 65 turbines. In general, the presented results indicate an insignificant impact of the Botiyevo wind farm turbines on ornithocomplexes inhabiting the study area and adjacent buffer zones. The obtained data can be used to assess the environmental risk of other wind energy projects and to develop strategies to reduce the negative impact of wind farms on migrating birds.

*Key words:* wind farms, ornithological complexes, birds, bird-turbine collisions.

*Поступила в редакцию 25.05.25  
Принята к печати 01.09.25*