

УДК 598.2; 504.05/.06

Программное обеспечение для анализа возможности столкновения птиц с роторами ветровых электроустановок

Осадчий Вячеслав Владимирович¹, Еремеев Владимир Сергеевич²,
Осадчая Екатерина Петровна³

*Мелитопольский государственный педагогический университет
имени Богдана Хмельницкого,
г. Мелитополь, Украина*

¹ доктор педагогических наук, профессор,
заведующий кафедрой информатики и кибернетики
orcid.org/0000-0001-5659-4774, osadchyi@mdpu.org.ua

² доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатики и кибернетики
orcid.org/0000-0002-0131-0049, evs1938@gmail.com

³ кандидат педагогических наук, доцент,
доцент кафедры информатики и кибернетики
orcid.org/0000-0003-0653-6423, okp@mdpu.org.ua

Аннотация. Разработана программа «Birds» для проведения анализа рисков столкновений птиц с турбинами ветровых электростанций. Математическая модель программы построена на рекомендациях Фонда «Шотландское природное наследие». База исходных данных содержит необходимую информацию применительно к условиям эксплуатации ветропарка «Приморск-1», который предполагается построить на побережье Азовского моря в Запорожской области. При необходимости пользователь может ввести свои значения и получить результаты о взаимодействии птиц с роторами ВЭУ по следующим показателям: время пролёта птицы через роторное пространство, вероятность столкновения одной особи с турбиной в зависимости от её полётных характеристик и параметров ветровой электроустановки, количество столкновений птиц на территории ветропарка в заданный промежуток времени. Тестирование программы проводилось на примере расчета количества столкновений птиц с роторами в течение одного года эксплуатации ветропарка «Приморск-1». Показано, что вероятность столкновения одной птицы с ротором слабо зависит от её геометрических размеров и находится в пределах 11-15%. Суммарное количество столкновений всех птиц на территории ветропарка составит 6,4 птицы, что соответствует 0,25 особей в расчёте на одну турбину. Большая часть из этого количества (около 4.8) относится к двум видам: *Merops apiaster* и *Larus ridibundus*.

Ключевые слова: ветровая электростанция; ветропарк; мониторинг; орнитология; птицы; экология.

Software for analyzing the probability of collisions of birds with rotors of wind electrical installations

Viacheslav Osadchyi¹, Volodymyr Yeremieiev², Kateryna Osadcha³

*Bogdan Khmelnytsky Melitopol state pedagogical university,
Melitopol, Ukraine*

¹ *Doctor of Pedagogic Sciences, Professor,
Head of the Department of Informatics and Cybernetics
orcid.org/0000-0001-5659-4774, osadchyi@mdpu.org.ua*

² *Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Computer Science and Cybernetics
orcid.org/0000-0002-0131-0049, evs1938@gmail.com*

³ *PhD, Associate professor,
Associate professor of the Department of Computer Science and Cybernetics
orcid.org/0000-0003-0653-6423, okp@mdpu.org.ua*

Abstract. The program "Birds" has been developed for analyzing the risks of bird collisions with turbines of wind power stations. The mathematical model of the program is based on the recommendations of the Scottish Natural Heritage Foundation. The source database contains the necessary information in relation to the operating conditions of the wind farm "Primorsk-1", which is supposed to be built on the coast of the Azov Sea in the Zaporizhia region. If necessary, the user can enter his own values and get results on the interaction of birds with wind turbine rotors on the following indicators: bird flight time through the rotor space, probability of collision of one individual with the turbine, depending on its flight characteristics and parameters of the wind electrical installation, number of bird collisions at a given time interval. The program was tested using the example of calculating the number of collisions of birds with rotors during one year of operation of the Primorsk-1 wind park. It is shown that the probability of a collision of one bird with the rotor depends little on its geometric dimensions and is in the range of 11-15%. The total number of collisions of all birds on the territory of the wind farm will be 6,4 birds, which corresponds to 0.25 individuals per turbine. Most of this amount (about 4.8) refers to two species: *Merops apiaster* and *Larus ridibundus*.

Keywords: wind farm; wind park; monitoring; ornithology; birds; ecology.

ВВЕДЕНИЕ

Ветровые электростанции (ВЭС) по сравнению с другими энергогенерирующими производствами обладают большими преимуществами, которые, в частности, обеспечивают существенное снижение выброса углекислого газа в атмосферу. В последние годы ветровая энергетика активно развивается в Украине. В Запорожской области функционирует Ботиевский ветропарк, который входит в пятерку самых крупных ВЭС Центральной и

Восточной Европы. Энергетический холдинг Украины ДТЭК планирует возвести на берегу Азовского моря в Запорожской области Приморскую ВЭС общей мощностью до 200 МВт. Для размещения станции выбраны два участка. Один из них «Приморск-1» расположен около г. Приморск, второй «Приморск-2» – вблизи Ботиевской ВЭС. На каждом участке будет построено по 26 ветровых электроустановок (ВЭУ). В связи с воздействием работающих ветровых агрегатов на перелеты птиц строительство станций вызывает определённую тревогу у экологов ([Анненков, Горлов, Сіохін В., Сальнікова-Буденко, & Сіохін Є., 2014](#)). Одним из первых предостережений против возведения ВЭС, как объектов, угрожающих птицам, стали результаты исследований на ветровой станции Altamont Pass в Сан-Франциско, где в 1982 году введён в строй ветропарк с 5400 турбинами. Из литературных источников известно, что от соприкосновения с лопастями ВЭУ здесь погибает от 800 до 1300 хищных и 22000 воробьиных птиц ежегодно ([Center for Biological Diversity, n/d](#)).

Согласно данным ([Lekuona, & Ursúa, 2007](#)) на Испанской станции в Наварро погибало 20.6 грифов на одну турбину ежегодно и несколько тысяч мелких птиц. Похожие исследования проведены в Висконсине (США). На территории ветровой станции, где расположена 31 турбина, за двухлетний срок зафиксировано 25 случаев гибели птиц.

В Германии проведён мониторинг взаимодействия птиц с роторами ВЭС на острове Fehmarn, который расположен на путях интенсивного миграционного потока. Средние показатели гибели птиц в расчёте на одну ветроустановку в год составили около 13 особей. Интересно, что при сравнении подобных показателей для площадок ВЭС, которые расположены за пределами интенсивного миграционного пролёта, процент столкновений был почти таким же. Это доказано для ветростанций на западном побережье Германии ([Grünkorn, Diederichs, Stahl, Poszig, & Nehls, 2005](#)), а также в Нидерландах ([Krijgsveld, Akershoek, Schenk, Dijk, & Dirksen, 2009](#)).

С целью изучения масштабов гибели птиц от столкновения с агрегатами ВЭУ известные американские консультанты по вопросам взаимодействия ветроэнергетики с птицами Dick Curry и Paul Kerlinger организовали наблюдения на многих ВЭС в Канаде и США ([Curry & Kerlinger, n/d](#)). Результаты их исследований представлены в [табл. 1](#).

Таблица 1

Характеристика случаев гибели птиц на площадках ВЭС в США и Канаде ([Curry & Kerlinger, n/d](#))

Место наблюдений	Число турбин	Период наблюдений	Количество погибших птиц
Массачусетс	8	Осень-зима, 1993	0
Мэдисон	7	1 год (2201-2002)	4
Копенгаген (Нью Йорк)	2	Осень, 1994	0
Пенсильвания	8	1 год (2000-2001)	0
Айова	3	3 сезона миграции	0
Канзас	2	3 сезона миграции	0

Продолжение табл. 1

Место наблюдений	Число турбин	Период наблюдений	Количество погибших птиц
Миннесота	200	1997-2002	53 (1 хищник)
Висконсин	31	1999-2000	25
Altamont Pass	5400	За все годы	Высокая смертность
Montezumma Hills	248	2 года	13 (10 хищных птиц)
Tehachapi Pass	3700	За все годы	Низкая смертность
Колорадо	29	1998-20002	16 (1 хищник)
Орегон	38	1999	12
Вайоминг	105	1998-2000	75 (3 хищника)
Канада	26	2 сезона миграции	0

Из табл. 1 видно, что смертность птиц на территории ВЭС в США и Канаде изменяется в широких пределах. Согласно информации, собранной в работах (Powlesland, 2009; Горлов, & Сіохін, 2012), аналогичная картина отмечается на всех континентах. Поэтому проведение исследований возможности гибели конкретной ВЭС является практически важной задачей. Столкновение птиц с роторами ветроустановок зависит от большого числа факторов (Powlesland, 2009), среди которых отметим конструкцию ВЭУ (Band, 2012), погодные условия, полётные характеристики птиц и способность избегать столкновения с роторами за счёт изменения траектории полёта вблизи ВЭУ (May, & et al., 2010; Furness, 2015), что затрудняет изучение возможности гибели птиц при эксплуатации ВЭС. Настоящая работа посвящена созданию программного обеспечения и анализу с его использованием взаимодействия птиц с роторами ВЭУ на территории ветропарка «Приморск-1».

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Основные параметры ВЭС «Приморск-1». На территории ветропарка «Приморск-1» площадью 10,1 км² планируется возвести 26 ВЭУ, геометрические параметры которых приведены на рис. 1.

Основным элементом конструкции ВЭУ, который может стать причиной гибели птиц, является ротор диаметром 134 м с тремя лопастями. Расстояние от земли до нижней части ротора $H_1 = 48$ м, до верхней части $H_2 = 182$ м. Длина лопасти составляет 67 м, ширина в самом широком месте равна 4.1 м, максимальная скорость вращения ветроколеса – 14 об/мин.

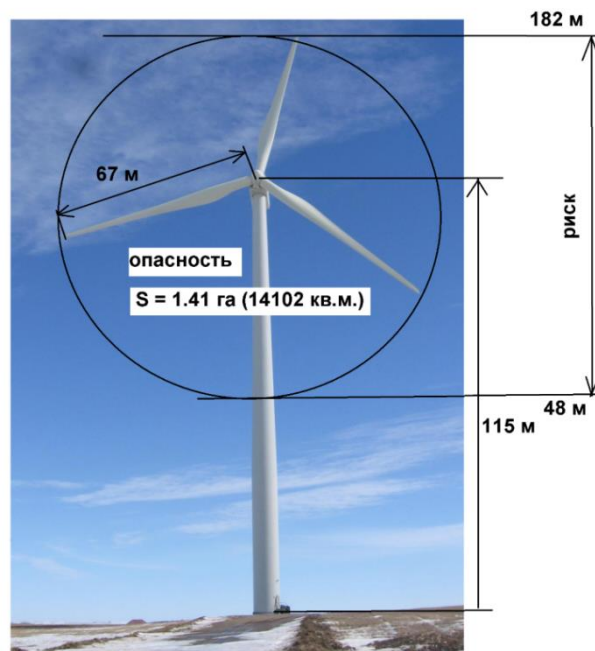


Рис. 1. Геометрические параметры ВЭУ на территории ветропарка «Приморск-1»

2. Исходные данные по активности птиц на территории ветропарка. Методика расчета проведения сравнительной оценки влияния строительства и эксплуатации ВЭС на сезонные перемещения птиц изложены в работе (Горлов, & Сіохін, 2014). Эта методика проверена на примере многолетних наблюдений за птицами на территории Ботиевской ветровой станции и позволяет получить объективную информацию, необходимую для прогнозирования взаимодействия птиц с ВЭУ (Горлов, Сидоренко, & Сіохін, 2016). В настоящей работе использовались результаты орнитологического мониторинга, которые проводили П. И. Горлов и В. Д. Сіохін на трёх участках наблюдения с общей площадью $S = 2,59 \text{ км}^2$, расположенных на территории создаваемого ветропарка «Приморск-1». В процессе мониторинга определялось количество птиц j -го вида n_j и время их t_j нахождения в зоне риска (ЗР). Под ЗР понимается всё пространство на участках наблюдения между нижним H_1 и верхним H_2 уровнями ветроколеса ВЭУ.

Время мониторинга выбиралось таким образом, чтобы получить информацию о поведении птиц в наиболее активный период их жизнедеятельности, связанный с весенней и осенней миграцией. Наблюдения осуществлялись в утренние и вечерние часы длительностью по 3 часа. Общее время наблюдения для каждой площадки составляло 144 часа. В течение всего периода мониторинга на всех площадках зарегистрировано 72 птицы в ЗР. Среди них 43 особи относятся к *Larus ridibundus*, 15 – к *Merops apiaster*, 9 – к *Circus aeruginosus*, 5 – к *Buteo buteo* и *Circus aeruginosus*. Сумма произведений количества птиц на время их нахождения в ЗР оказалась равным 2196 секунд.

3. Математическая модель для расчёта количества столкновений птиц с роторами ВЭУ. Рекомендации прогнозирования возможности гибели птиц за

счёт соударений с роторами ВЭУ изложены в работе Фонда «Шотландское природное наследие» ([Scottish Natural Heritage, 2014](#)). Они нашли широкое признание среди специалистов Европейских стран при оценивании риска гибели птиц в результате взаимодействия с ветроколёсами ВЭУ ([Krijgsveld, Akershoek, Schenk, Dijk, & Dirksen, 2009](#); [Morinha et al., 2014](#); [Jervis, McGovern, Sweeney, & Buisson, 2017](#)). В настоящей статье также использовались основные положения этой методики.

Введём понятие опасной зоны (ОЗ), связанной с пространством, которое занимают все ветроколёса ВЭС. Следуя рекомендации работы ([Band, 2000](#)), будем считать, что все птицы в ОЗ пересекают поверхность ветроколеса под прямым углом к его поверхности. Это предположение не оказывает существенного влияния на результаты прогноза ([Band, Madders, & Whitfield, 2007](#)).

Можно показать, что количество столкновений птиц j -го вида с одним ротором на территории ветропарка определится формулой

$$n_{cmj} = \frac{f\pi R_v^2 v_j T P_j}{T_{зр} S \delta H} \sum_i n_{ji} t_{ji}, \quad (1)$$

где суммирование проводится по всем птицам j -го вида с номером i , R_v – радиус ветроколеса, v_j – скорость птицы, T – период эксплуатации ВЭС, $T_{зр}$ – промежуток времени, в течение которого проводились наблюдения птиц, P_j – вероятность столкновения одной птицы с лопастями ротора в случае пролёта через пространство одного ветроколеса в ОЗ, f – коэффициент «уклонения», который учитывает вероятность изменения направления перемещения птицы при подлёте к ротору ВЭУ.

Для проведения вычислений необходимо рассчитать вероятность P_j столкновения одной особи j -го вида птицы с роторами ВЭУ применительно к параметрам ВЭС «Приморск-1». При проведении расчётов были использованы результаты мониторинга участков наблюдения, расположенных на территории создаваемого ветропарка «Приморск-1».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. *Вывод основных формул и построение расчётных алгоритмов.* Расчёт количества столкновений птиц j -го вида на территории ветропарка проводился по формуле (1), которая в несколько ином виде предложена в статье ([Band, Madders, & Whitfield, 2007](#)). Результаты вычислений во многом зависят от геометрической формы представления птицы. В работе ([Band, 2000](#)) применялась крестовидная модель с расположением крыльев посередине между клювом и кончиком хвоста ([рис. 2а](#)). Использование этой модели несколько занижает рассчитываемую вероятность столкновения. В настоящей исследовании птица представляется в виде прямоугольника ([рис. 2б](#)). Одна из его сторон принимается равной длине птицы L_1 , а другая - размаху крыльев L_2 . Подобная модель в отличие от крестовидной незначительно завышает расчётную величину вероятности.

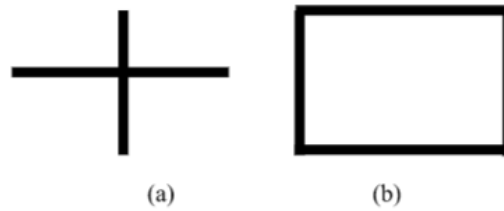


Рис. 2. Крестообразная (а) и прямоугольная (b) модели птиц

Обозначим часть фронтальной площади ветроколеса, которая ответственна за столкновение птицы j -го вида с турбиной, через S_j . Значение S_j складывается из площади втулки $S_{\text{втулка}}$, являющейся основанием лопастей и равной πR_0^2 , где R_0 – радиус втулки, и площадей S_{ij} , связанных с тремя лопастями:

$$S_j = S_{\text{втулка}} + \sum_{i=1}^{i=3} S_{ij} . \quad (2)$$

К настоящему времени форма лопасти для ВЭУ ветропарка «Приморск-1» неизвестна, поэтому в дальнейшем будем считать, что ширина лопасти d не зависит от расстояния r до оси вращения ветроколеса. Величина S_{ij} состоит из двух слагаемых $S_{ij1} + S_{ij2}$. Одно из них S_{ij1} равно фронтальной площади лопасти, т.е. проекции лопасти на плоскость ветроколеса:

$$S_{ij1} = d \cos(\gamma) (R_v - R_0), \quad (3)$$

где γ – угол заклинения лопасти между его хордой и плоскостью вращения ветроколеса.

Второе слагаемое S_{ij2} учитывает размах крыльев птицы L_{2j} . Соответствующая этому слагаемому область на рис. 3 помечена знаками \longleftrightarrow . Размер этой области равен

$$S_{ij2} = L_{2j} \sin(\alpha_i) (R_v - R_0), \quad (4)$$

где α_i – угол наклона i -й лопасти к горизонту.

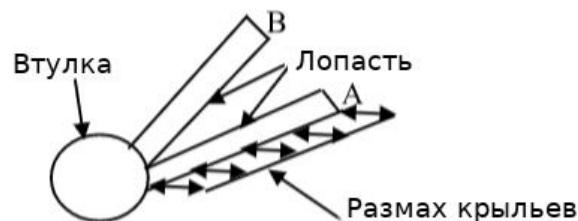


Рис. 3. Схема части ветроколеса при перемещении лопасти из позиции А в позицию В

Вероятность столкновения птицы j -го вида с покоящейся турбиной P_{aj} при отсутствии ветра для фиксированных значений a_i равна отношению площади (4) к общей площади ветроколеса, равного πR_v^2 :

$$P_{aj} = (S_{\text{ветулка}} + \sum_{i=1}^{i=3} S_{ij}) / (\pi R_v^2). \quad (5)$$

Усреднённая вероятность столкновения птицы j -го вида $P_{\text{стаи}j}$ в стационарном состоянии турбины получается интегрированием (5) по углу a :

$$P_{\text{стаи}j} = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P_{aj} d\alpha / \pi = [\pi R_0^2 + 3(d \cos(\gamma) + 6L_{2j} / \pi)(R_v - R_0)] / (\pi R_v^2). \quad (6)$$

Значение вероятности, вычисленной по формуле (6), относится к покоящемуся ветроколесу. В рабочем состоянии следует учесть поправку на вращение. Пусть в некоторый момент времени лопасть занимает положение A (рис. 3). Время пролёта t_j птицы j -го вида через ротор со скоростью v_j равно

$$t_j = (d \sin(\gamma) + L_{1j}) / v_j, \quad (7)$$

где L_{1j} – длина птицы j -го вида.

За время t_j , определяемое формулой (7), ветроколесо повернётся на угол ωt_j , где ω – угловая скорость вращения, в результате чего лопасть переместится в позицию B (рис. 3). Можно показать, что в первом приближении площадь, определяющая столкновение птицы с одной лопастью, равна

$$S_{1j} = \pi R_0^2 + 2(R_v - R_0)L_{2j} / \pi + (R_v - R_0)d \cos(\gamma) + (R_v - R_0)^2 \omega t_j / 2. \quad (8)$$

Как и в стационарном случае (6), второе слагаемое в выражении (8) содержит поправку на размах крыльев. Оно получается путём интегрирования по углу a . Аналогичным образом можно определить размер зоны столкновения с двумя другими лопастями S_2 , и S_3 и после незначительных упрощений представить формулу для оценки вероятности столкновения одной птицы с ветроколесом в виде

$$P_j = [\pi R_0^2 + 6(R_v - R_0)L_{2j} / \pi + 3(R_v - R_0)d \cos(\gamma) + 3(R_v - R_0)^2 \omega t_j / 2] / (\pi R_v^2). \quad (9)$$

Выражение (8) несколько завышает действительное значение площадей S_{ij} , ответственных за столкновение. Кроме того, оно не учитывает зависимости хорды лопасти от радиуса и зависимости угла a от угла поворота лопасти. Поэтому вероятность, рассчитанная по формуле (9), даёт скорее качественный чем количественный результат. Более корректный подход предложен в работе (Band, 2000), где для вычисления вероятности используется формула

$$P_j = \iint p_j(r, \varphi) r dr d\varphi / \pi R_v^2, \quad (10)$$

где $p_j(r, \varphi)$ – плотность вероятности столкновения птицы в зоне колеса в зависимости от r и φ .

Применение формулы (10) требует громоздкого геометрического анализа. Использование ряда упрощений, в частности пренебрежения зависимости предела интегрирования по углу от радиуса, формулу (10) можно представить в виде (Band, 2000):

$$P_j = 2 \int_{\rho_0}^1 p_j(\rho) \rho d\rho \quad (11)$$

где $\rho = r/R_v$.

Подстановка вероятности P_j из (11) в (1) позволяет рассчитать ожидаемое количество столкновений птиц j -го вида с одной турбиной на территории ветропарка:

$$n_{cmj} = 2\pi R^2 v T f \int_{\rho_0}^1 p(\rho) \rho d\rho \sum_i n_{ij} t_{ij} / (T_{nscj} \delta HS_{3Pj}) \cdot \quad (12)$$

Подстановка вероятности P_j из (9) в (1) даёт более простую формулу для оценки ожидаемого количества столкновений:

$$n_{cmj} = \frac{v_j T_j \{ \pi R_0^2 + 3(R_v - R_0) [2L_{2j} / \pi + d \cos(\gamma) + (R_v - R_0) (d \sin(\gamma) + L_{1j})] \} \varpi / 2v_j \} f}{T_{3P} S \delta H} \sum_i n_{ji} t_{ji} \cdot \quad (13)$$

Анализ показывает, что при относительно небольших скоростях вращения и больших размерах турбины формулы (12) и (13) дают близкие результаты.

2. *Описание программного продукта.* Для проведения вычислений составлена программа «Birds» с использованием программной среды Visual C++ 2008. Программа позволяет рассчитать время пролёта птицы через ротор, вероятность столкновения одной птицы с лопастями одного ветрового агрегата и числа столкновений птиц с роторами в течение заданного времени эксплуатации ВЭС. Входными факторами математической модели являются все константы, содержащиеся в формулах (1), (7), (9), (13), а именно:

- параметры, определяющие полётные характеристики птиц j -го вида,
- количество птиц всех видов, зарегистрированных в ЗР,
- время пребывания каждой птицы в ЗР,
- необходимые данные по каждому из участков наблюдения за птицами,
- характеристики элементов конструкций ВЭУ,
- условия эксплуатации ВЭС.

База исходных данных в программе содержит параметры, отвечающие условиям эксплуатации ветропарка «Приморск-1» и результатам мониторинга за поведением птиц на трёх участках наблюдения ПС-1, ПС-2, ПС-3 в 2017 г. При необходимости пользователь может ввести свои значения и вывести на дисплей необходимую информацию. В качестве примера на [рис. 4](#)

представлены результаты вычислений по взаимодействию птиц четырёх видов *Buteo buteo*, *Circus aeruginosus*, *Merops apiaster* и *Larus ridibundus* с роторами в течение одного года эксплуатации ветропарка «Приморск-1». На дисплей выведены данные о вероятности столкновения особей с турбинами и количестве их столкновений по сезонам.

```
Вероятность столкновения для Buteo равна 0.185523
ButeoSpring=0
ButeoAutumn=0.822786
ButeoYear=0.822786
Вероятность столкновения для Circus равна 0.191883
CircusSpring=0.605898
CircusAutumn=0.761099
CircusYear=1.367
Вероятность столкновения для Merops равна 0.10833
MeropsSpring=0.838237
MeropsAutumn=0
MeropsYear=0.838237
Вероятность столкновения для Larus равна 0.169093
LarusSpring=1.92957
LarusAutumn=1.5104
LarusYear=3.43997
```

Рис. 4. Вероятность и количество столкновений птиц с турбинами по сезонам

3. *Расчёт количества столкновений птиц с роторами.* Вычисления проводились с использованием программы «Birds» при значениях параметров, характерных для условий эксплуатации ветропарка «Приморск-1»:

- максимальная скорость вращения ω ветроколеса - 14 об/мин,
- радиус R_0 втулки ротора 3,0 м,
- длина R_v лопасти ротора 67м,
- максимальная ширина d лопасти 4,1 м,
- угол установки лопасти γ (угол между хордой сечения лопасти и плоскостью ветроколеса) 30° .

Зависимость ширины лопасти от радиуса на сегодня не установлена. Можно ожидать, что среднее значение d будет не менее чем на 50% процентов меньше максимальной величины. Согласно проведённым расчётам изменение ширины лопасти от 3.0 м до 4.1 м для угловой скорости вращения ветроколеса 14 оборотов в минуту приводит к относительно небольшому повышению вероятности столкновения птиц (примерно на 20-30%). Общая площадь участков наблюдения принималась равной $S=2,59$ км², разность высот, определяющих глубину ЗР – $\delta H = H_2 - H_1 = 134$ м.

В процессе мониторинга поведения птиц на территории ветропарка «Приморск-1» (участки наблюдения ПС-1, ПС-2, ПС-3) в 2017 г. в ЗР зарегистрированы птицы четырёх видов: *Larus ridibundus*, *Merops apiaster*, *Circus aeruginosus* и *Buteo buteo*. Сумма произведений количества птиц каждого вида на время их нахождения в ЗР в секундах равнялась 1230 для *Larus ridibundus*, 495 – для *Merops apiaster*, 329 – для *Circus aeruginosus* и 142 – для *Buteo buteo*. Полётные характеристики этих птиц приведены в [табл. 2](#).

Таблица 2

Полётные характеристики птиц
(Alerstam, Rosén, Bäckman, Ericson, & Hellgren, 2007)

Вид птицы	Длина птицы, L_{1j} , м	Размах крыльев L_{2j} , м	Скорость полета, м/с
<i>Buteo buteo</i>	0,54	1,2	11,6
<i>Circus aeruginosus</i>	0,55	1,25	11,2
<i>Larus ridibundus</i>	0,37	0,93	11,9
<i>Merops apiaster</i>	0,28	0,47	19,7

Длительность наблюдений $T_{ЗР}$ в ЗР для всех участков и видов птиц была одинаковой и зависела только от сезона. В табл. 3 приведены значения $T_{ЗР}$ и продолжительность фазы жизненного цикла T птиц, соответствующая эксплуатации ветропарка «Приморск-1» в течение одного года. Величина T рассчитана исходя из условно светлых 12 часов в сутки в среднем за один год.

Таблица 3

Длительность наблюдений $T_{ЗР}$ и фазы жизненного цикла птиц $T_{фжц}$

Цикл наблюдений	Длительность наблюдений $T_{ЗР}$, часы				Т, дни	Т/ $T_{ЗР}$
	ПС-1	ПС-2	ПС-3	$\Sigma T_{ЗР}$		
Миграция весной	24	24	24	72	85	85
Гнездование	42	42	42	126	90	51
Миграция осенью	36	36	36	108	100	66,7
Зимний период	42	42	42	126	90	51
Всего	144	144	144	432	365	

В качестве примера рассмотрим результаты вычислений для птицы вида *Buteo buteo*. Вероятность столкновения с ротором, вычисленная по формуле (6) для стационарного случая при отсутствии ветра для случая, когда птица пролетает через пространство ротора, равна 0.043. При скорости вращения ветроколеса, равного 7 оборотов в минуту, вероятность равна 0,114. Это значение согласуется с данными работы (Band, 2000), где рассчитанная величина вероятности находится в пределах 0,093-0,17. Повышение скорости до максимальной величины 14 оборотов приводит к повышению вероятности до 0.19. При гипотетической скорости порядка 95 оборотов в минуту, которая примерно в 7 раз превышает максимальное значение, вероятность достигнет 1, т.е. 100%.

Способность птицы изменять направление полёта вблизи ВЭУ и таким образом уклоняться от столкновения с ротором определяется коэффициентом «уклонения» f в формуле (1). Наиболее вероятное величина коэффициента f находится в интервале 0,05-0,005 (May et al., 2010; Furness, 2015). После анализа литературных данных по взаимодействию птиц с турбинами, в работе

(Furness, 2015) высказано предположение, что в действительности значение f меньше 0.005. При проведении расчётов в настоящей работе величина f принималась равной 0.05, что соответствует самой неблагоприятной ситуации. В этом случае прогнозируемое количество столкновений птицы вида *Buteo buteo* на территории ВЭС в течение одного года составит 0.82 или в расчёте на одну турбину – 0.032.

Результаты прогноза риска столкновений всех птиц на территории ветропарка «Приморск-1» с одним и со всеми роторами ВЭУ в течение одного года представлены в табл. 4, где приняты следующие обозначения: t_j - время пролёта птицы через пространство ротора, P_j - вероятность столкновения одной птицы с ротором, n_{cmj} - прогнозируемое число столкновений птиц различных видов на всей станции по отдельным сезонам (пятый столбец), на всей станции в течение одного года (шестой столбец), в течение одного года в расчёте на одну турбину (седьмой столбец).

Таблица 4

Прогноз риска столкновений птиц на территории ветропарка «Приморск-1» с роторами ВЭУ в течение одного года

Вид	Сезон	t_j , секунды	P_j	n_{cmj} на ВЭС по сезонам	n_{cmj} за год на ВЭС	n_{cmj} за год на одну турбину
Канюк обыкновенный (<i>Buteo buteo</i>)	Весна	0,22	0,19	0	0,82	0,032
	Лето			0		
	Осень			0,82		
	Зима			0		
Лунь болотный (<i>Circus aeruginosus</i>)	Весна	0,23	0,19	0,61	1,37	0,053
	Лето			0		
	Осень			0,76		
	Зима			0		
Щурка золотистый (<i>Merops apiaster</i>)	Весна	0,12	0,11	0,84	0,84	0,032
	Лето			0		
	Осень			0		
	Зима			0		
Чайка озёрная (<i>Larus ridibundus</i>)	Весна	0,20	0,17	1,93	3,44	0,130
	Лето			0		
	Осень	0,20		1,51		
	Зима	0				

Вероятность столкновения одной птицы P_j при нахождении в пространстве ротора слабо зависит от её геометрических параметров. Из табл. 4 видно, что значение P_j для всех наблюдаемых видов *Buteo buteo*, *Circus aeruginosus*, *Merops apiaster* и *Larus ridibundus* находится в пределах 11-15%. Суммарное количество столкновений всех птиц на территории ветропарка составит 6.4 птиц, что соответствует 0.25 особям в расчёте на одну турбину. Большая часть из этого количества (около 4.8) относится к двум видам: *Merops apiaster* и *Larus ridibundus*.

Результаты исследований случаев гибели птиц за счёт столкновения с турбинами ВЭУ в США и Канаде (Curry & Kerlinger, n/d), представленные в

табл. 1, изменяются от 0 до 0.81 в расчёте на одну турбину, что сопоставимо с нашей оценкой, равной 0.25. Так, в штате Мэдисон в течение одного года погибало 0.57 птиц в расчёте на одну турбину, в штате Висконсин – 0.81, в Колорадо – 0.55, в штате Орегон – 0.32, в штате Вайоминг – 0.36. В штатах Массачусетс, Копенгаген (Нью Йорк), Айова, Канзас случаев гибели птиц на территории ВЭС не обнаружено.

Во многих отчётах отмечается, что вероятность столкновения с роторами ВЭУ у птиц большего размера более высокая ([Powlesland, 2009](#)). Так, по данным исследований Винкельмана показатели гибели птиц большого размера для морского побережья находятся в пределах 2.4–56.2 ([Winkelman, 1992](#)). Средние показатели гибели птиц на острове Fehmarn в Германии составили около 13 особей ([Grünkorn, Diederichs, Stahl, Poszig, & Nehls, 2005](#)). На Испанской станции в Наварро ежегодно погибало 20.6 грифов на одну турбину ([Lekuona, & Ursúa, 2007](#)). При сравнении показателей для площадок ВЭУ, которые расположены за пределами интенсивного миграционного пролета, процент столкновений был почти таким же. Это доказано на примере ветростанций на западном побережье Германии ([Grünkorn, Diederichs, Stahl, Poszig, & Nehls, 2005](#)) и в Нидерландах ([Krijgsveld, Akershoek, Schenk, Dijk, & Dirksen, 2009](#)).

Используемая методика прогноза содержит ряд предположений, главными из которых являются:

- Величина коэффициента, учитывающего уклонение птицы при встрече с турбиной равна 0.05. Можно ожидать, что действительное значение будет ещё меньше ([Furness, 2015](#)), и результаты прогноза окажутся более оптимистичными.

- Погодные условия не оказывают влияния на траекторию полёта птицы.
- Направление подлёта птицы к ВЭУ совпадает с осью ветроколеса.
- Вероятность столкновения птиц с башней и гондолой ВЭУ, а также с другими постройками на территории ветропарка не учитывается.

Исходя из выше изложенного, можно ожидать, что рассчитанное в настоящей работе количество столкновений птиц с роторами является верхней границей действительной величины, которая, скорее всего, на территории ветропарка «Приморск-1» будет менее 6.4 особей в год.

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Взаимодействие птиц с роторами ВЭУ определяется многочисленными факторами (до 100 и больше). Главными из них являются полётные характеристики птиц, плотность их распределения на территории ветропарка, эксплуатационные параметры ВЭУ и климатические условия. Анализ возможности гибели птиц за счёт их столкновения с турбинами предполагает проведение большого объёма вариантных расчётов. В настоящей работе создан программный продукт «Birds», который в существенной степени облегчает прогнозирование риска столкновения. В частности, с его помощью можно получить информацию о времени пролёта птицы через роторное пространство,

вероятности столкновения одной особи с турбиной и количестве столкновений птиц на территории ВЭС.

Тестирование программы проводилось на примере расчета количества столкновений птиц с роторами ветропарка «Приморск-1». Согласно полученным прогнозам общее число столкновений за один год эксплуатации ВЭС находится на уровне 6.4 птиц. Из этого количества 0.82 птиц относится к *Buteo buteo*, 1.37 – к *Circus aeruginosus*, 0.84 – к *Merops apiaster* и 3.44 – к *Larus ridibundus*. Полученные данные близки к результатам, которые приводятся во многих работах: 2.4–56.2 ([Winkelman, 1992](#)), 13 ([Grünkorn, Diederichs, Stahl, Poszig, & Nehls, 2005](#)), 20.6 ([Lekuona, & Ursúa, 2007](#)).

На основании проведенных вычислений и литературных источников ([Band, Madders, & Whitfield, 2007](#); [Erickson, Johnson, Stickland, Young, Sernka, & Good, 2001](#); [Lekuona, & Ursúa, 2007](#)) можно сделать следующие выводы:

1. Полученные данные и исследования, выполненные различными авторами в различных регионах по оценке столкновения птиц с турбинами ВЭУ, во многом согласуются друг с другом.
2. Ветровые установки нового поколения представляют меньшую угрозу для птиц по сравнению с предыдущими моделями.
3. Степень риска во время интенсивного миграционного пролета значительно не повышается.

Схема мониторинга территории ВЭС и математическая модель для расчета риска гибели птиц, используемая в настоящей работе, во многом совпадает с методом прогнозирования, который применяется в Европейских странах ([Band, 2000](#); [Band, 2012](#); [Krijgsveld, Akershoek, Schenk, Dijk, & Dirksen, 2009](#)). Полученные оценки носят ориентировочный характер, обусловленный методикой сбора информации и выбором математической модели. Поэтому исследования в этом направлении имеют практический интерес и будут продолжены.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Анненков, О. Б., Горлов, П. И., Сіохін, В. Д., Сальнікова-Буденко, І. Б., & Сіохін, Є. В. (2014). Методика використання Веб додатку «WebBirds» для моніторингу сезонних орнітокомплексів і комп'ютерного моделювання оцінки впливу ВЕС. У *Науково-методичні основи охорони та оцінки впливу на навколишнє природне середовище під час проектування, будівництва, експлуатації вітрових та сонячних електростанцій, ліній електромереж: методичний посібник* (с. 93-107). Мелітополь: МДПУ імені Б. Хмельницького.
- Горлов, П. И., Сидоренко, А. И., & Сіохін, В. Д. (2016). Багаторічний орнітологічний моніторинг на Ботієвській вітровій станції як об'єктивна складова оцінки впливу вітропарку на птахів. *Вісті Біосферного заповідника «Асканія-Нова»*, 18, 116-130.
- Горлов, П. И., & Сіохін, В. Д. (2012). Аналіз міжнародного досвіду вивчення впливу вітрових електростанцій на птахів. *Біологічний Вісник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького*, (1), 37-47.
- Горлов, П. И., & Сіохін, В. Д. (2014). Методика розрахунку ступеня впливу і схеми формування прогностичної моделі та порівняльної оцінки впливу будівництва і

- експлуатації ВЕС на сезонні комплекси птахів. У *Науково-методичні основи охорони та оцінки впливу на навколишнє природне середовище під час проектування, будівництва, експлуатації вітрових та сонячних електростанцій, ліній електромереж: методичний посібник* (с. 108-131). Мелітополь: МДПУ імені Б. Хмельницького.
- Alerstam, T., Rosén, M., Bäckman, J., Ericson, Per G. P., & Hellgren, O. (2007). Flight Speeds among Bird Species: Allometric and Phylogenetic Effects. *PLOS Biology*, 5 (8): e197. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050197>.
- Band, W. (2000). *Windfarms and Birds: Calculating a theoretical collision risk assuming no avoiding action*. Guidance note series: Scottish Natural Heritage. Retrieved from <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Band-2000.pdf>.
- Band, W. (2012). *Using a collision risk model to assess bird collision risks for offshore windfarms*. Retrieved from https://www.bto.org/sites/default/files/u28/downloads/Projects/Final_Report_SOSS_02_Band1ModelGuidance.pdf.
- Band, W., Madders, M., & Whitfield, D. P. (2007). Developing Field and Analytical Methods to Assess Avian Collision Risk at Wind Farms. In De Lucas, M., Janss, G. F. E., & Ferrer, M. (Eds.), *Birds and Wind Power: risk assessment and mitigation* (pp. 259-275). Madrid: Quercus Editions.
- Center for Biological Diversity. (n/d). *Fact Sheet on Altamont Pass Bird Kills*. San Francisco, CA, USA: Center for Biological Diversity. Retrieved from <http://www.biologicaldiversity.org/swcbd/Programs/bdes/altamont/factsheet.pdf>.
- Curry & Kerlinger. (n/d). *What Kills Birds?* Retrieved from <http://www.currykerlinger.com/studies.htm>.
- Erickson, W. P., Johnson, G. D., Stickland, M. D., Young, Jr. D. P., Sernka, K. J., & Good, R. E. (2001). *Avian collisions with wind turbines: a summary of existing studies and comparisons to other sources of avian collision mortality in the United States*. Washington, D.C.: National Wind Coordinating Committee. Retrieved from <https://www.osti.gov/servlets/purl/822418>.
- Furness, R. W. (2015). A review of red-throated diver and great skua avoidance rates at onshore wind farms in Scotland. *Scottish Natural Heritage Commissioned Report No. 885*. Retrieved from <https://www.nature.scot/sites/default/files/2017-07/Publication%202015%20-%20SNH%20Commissioned%20Report%20885%20-%20A%20review%20of%20red-throated%20diver%20and%20great%20skua%20avoidance%20rates%20at%20onshore%20wind%20farms%20in%20Scotland.pdf>.
- Grünkorn, T., Diederichs, A., Stahl, B., Poszig, D., & Nehls, G. (2005). *Entwicklung einer Methode zur Abschätzung des Kollisionsrisikos von Vögeln an Windenergieanlagen*. Untersuchungen im Auftrag des Landesamtes für Naturschutz des Landes Schleswig-Holstein. Retrieved from https://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/upool/gesamt/wea/voegel_wea.pdf.
- Janss, G. (2000). Bird Behaviour In and Near a Wind Farm at Tarifa, Spain: Management Considerations. In *Proceedings of National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California, May 1998* (pp. 110–114). Retrieved from https://nationalwind.org/wp-content/uploads/assets/research_meetings/Research_Meeting_III_Proceedings.pdf.
- Jervis, L., McGovern, S., Sweeney, S., & Buisson, R. (2017). *Offshore Ornithology – Collision Risk Modelling Report, 4, Annex 4-2*. London: Vattenfall Wind Power Ltd. Retrieved from <https://corporate.vattenfall.co.uk/globalassets/uk/projects/thanet-ext/peir-nov-2017/volume-4/vol4ann4-2-ornithologycrm.pdf>.

- Krijgsveld, K. L., Akershoek, K., Schenk, F., Dijk, F., & Dirksen, S. (2009). Collision risk of birds with modern large wind turbines. *Ardea*, 97 (3), 357–366.
- Lekuona, J. M., & Ursúa, C. (2007). Avian mortality in wind power plants of Navarra (northern Spain). In De Lucas, M., Janss, G. F. E., & Ferrer, M. (Eds.), *Birds and Wind Power: risk assessment and mitigation* (pp. 177-192). Madrid: Quercus Editions. Retrieved from <http://www.vliz.be/en/imis?module=ref&refid=111975&printversion=1&dropIMISitle=1>.
- Lowther, S. (2000). The European Perspective: Some Lessons from Case Studies. In *Proceedings of National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California, May 1998* (pp. 110–114). Retrieved from https://nationalwind.org/wp-content/uploads/assets/research_meetings/Research_Meeting_III_Proceedings.pdf.
- May, R., Hoel, P. L., Langston, R., Dahl, E. L., Bevanger, K., Reitan, O., Nygård, T., Pedersen, H. C., Røskaft, E., & Stokke, B. G. (2010). *Collision risk in white-tailed eagles. Modelling collision risk using vantage point observations in Smøla wind-power plant. NINA Report 639*. Retrieved from <http://www.nina.no/archive/nina/PppBasePdf/rapport/2010/639.pdf>.
- Morinha, F., Travassos, P., Seixas, F., Martins, A., Bastos, R., Carvalho, D., Magalhães, P., Santos, M., Bastos, E., & Cabral, J. A. (2014). Differential mortality of birds killed at wind farms in Northern Portugal. *Bird Study*, 61 (2), 255-259. DOI: [10.1080/00063657.2014.883357](https://doi.org/10.1080/00063657.2014.883357).
- Powlesland, R. G. (2009). Impacts of wind farms on birds: a review. The Terrace Wellington, New Zealand: Publishing Team Department of Conservation. Retrieved from <https://www.doc.govt.nz/Documents/science-and-technical/sfc289entire.pdf>.
- Scottish Natural Heritage. (2014). *Guidance. Recommended bird survey methods to inform impact assessment of onshore wind farms*. Retrieved from <https://www.nature.scot/sites/default/files/2017-09/Guidance%20note%20-%20Recommended%20bird%20survey%20methods%20to%20inform%20impact%20assessment%20of%20onshore%20windfarms.pdf>.
- Sugimoto, H., & Matsuda, H. (2011). Collision risk of White-fronted geese with wind turbines. *Ornithological Science*, 10 (1), 61-71. DOI: <https://doi.org/10.2326/osj.10.61>.
- Winkelman, J. E. (1992). *De invloed van de Sep-proefwindcentrale te Oosterbierum (Fr.) op vogels, 1: aanvaringslachtoffers*. RIN-rapport 92/2. Arnhem, Netherlands: DLO-Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

- Annenkov, O. B., Horlov, P. I., Siokhin, V. D., Salnikova-Budenko, I. B., & Siokhin, Ye. V. (2014). Methodology for using the web-based application "WebBirds" to monitor seasonal ornithocomplexes and computer simulation of the wind power plants impact. In *Naukovo-metodychni osnovy okhorony ta otsinky vplyvu na navkolnyshnie pryrodne seredovyshche pid chas proektuvannia, budivnytstva, ekspluatatsii vitrovykh ta soniachnykh elektrostantsii, linii elektromerezh: metodychnyi posibnyk* (p. 93-107). Melitopol: Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University. (in Ukrainian)
- Horlov, P. I., Sydorenko, A. I., & Siokhin, V. D. (2016). Perennial ornithological monitoring at Botievskaya wind station as an objective component of assessing the impact of the wind farm on birds. *Visti Biosferneho zapovidnyka «Askaniia-Nova»*, 18, 116-130. (in Ukrainian)

- Horlov, P. I., & Siokhin, V. D. (2012). Analysis of international experience in studying the influence of wind power plants on birds. *Biologichnyi Visnyk Melitopolskoho derzhavnogo pedahohichnoho universytetu imeni Bohdana Khmelnytskoho*, (1), 37–47. (in Ukrainian)
- Horlov, P. I., & Siokhin, V. D. (2014). Method of calculation of the degree of influence and the scheme of forming a prediction model and a comparative assessment of the impact of the construction and operation of wind farms on seasonal bird complexes. In *Naukovo-metodychni osnovy okhorony ta otsinky vplyvu na navkolysnhie pryrodne seredovyshe pid chas proektuvannia, budivnytstva, ekspluatatsii vitrovykh ta soniachnykh elektrostantsii, linii elektromerezh: metodychnyi posibnyk* (p. 108-131). Melitopol: Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University. (in Ukrainian)
- Alerstam, T., Rosén, M., Bäckman, J., Ericson, Per G. P., & Hellgren, O. (2007). Flight Speeds among Bird Species: Allometric and Phylogenetic Effects. *PLOS Biology*, 5 (8): e197. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050197>. (in English)
- Band, W. (2000). *Windfarms and Birds: Calculating a theoretical collision risk assuming no avoiding action*. Guidance note series: Scottish Natural Heritage. Retrieved from <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Band-2000.pdf>. (in English)
- Band, W. (2012). *Using a collision risk model to assess bird collision risks for offshore windfarms*. Retrieved from https://www.bto.org/sites/default/files/u28/downloads/Projects/Final_Report_SOSS_02_Band1ModelGuidance.pdf. (in English)
- Band, W., Madders, M., & Whitfield, D. P. (2007). Developing Field and Analytical Methods to Assess Avian Collision Risk at Wind Farms. In De Lucas, M., Janss, G. F. E., & Ferrer, M. (Eds.), *Birds and Wind Power: risk assessment and mitigation* (pp. 259-275). Madrid: Quercus Editions. (in English)
- Center for Biological Diversity. (n/d). *Fact Sheet on Altamont Pass Bird Kills*. San Francisco, CA, USA: Center for Biological Diversity. Retrieved from <http://www.biologicaldiversity.org/swcbd/Programs/bdes/altamont/factsheet.pdf>.
- Curry & Kerlinger. (n/d). *What Kills Birds?* Retrieved from <http://www.currykerlinger.com/studies.htm>. (in English)
- Erickson, W. P., Johnson, G. D., Stickland, M. D., Young, Jr. D. P., Sernka, K. J., & Good, R. E. (2001). *Avian collisions with wind turbines: a summary of existing studies and comparisons to other sources of avian collision mortality in the United States*. Washington, D.C.: National Wind Coordinating Committee. Retrieved from <https://www.osti.gov/servlets/purl/822418>. (in English)
- Furness, R. W. (2015). A review of red-throated diver and great skua avoidance rates at onshore wind farms in Scotland. *Scottish Natural Heritage Commissioned Report No. 885*. Retrieved from <https://www.nature.scot/sites/default/files/2017-07/Publication%202015%20-%20SNH%20Commissioned%20Report%20885%20-%20A%20review%20of%20red-throated%20diver%20and%20great%20skua%20avoidance%20rates%20at%20onshore%20wind%20farms%20in%20Scotland.pdf>. (in English)
- Grünkorn, T., Diederichs, A., Stahl, B., Poszig, D., & Nehls, G. (2005). *Entwicklung einer Methode zur Abschätzung des Kollisionsrisikos von Vögeln an Windenergieanlagen*. Untersuchungen im Auftrag des Landesamtes für Naturschutz des Landes Schleswig-Holstein. Retrieved from https://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/upool/gesamt/wea/voegel_wea.pdf. (in Deutsch)
- Janss, G. (2000). Bird Behaviour In and Near a Wind Farm at Tarifa, Spain: Management Considerations. In *Proceedings of National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California, May 1998* (pp. 110–114). Retrieved from

- https://nationalwind.org/wp-content/uploads/assets/research_meetings/Research_Meeting_III_Proceedings.pdf. (in English)
- Jervis, L., McGovern, S., Sweeney, S., & Buisson, R. (2017). *Offshore Ornithology – Collision Risk Modelling Report, 4*, Annex 4-2. London: Vattenfall Wind Power Ltd. Retrieved from <https://corporate.vattenfall.co.uk/globalassets/uk/projects/thanet-ext/peirnov-2017/volume-4/vol4ann4-2-ornithologycrm.pdf>. (in English)
- Krijgsveld, K. L., Akershoek, K., Schenk, F., Dijk, F., & Dirksen, S. (2009). Collision risk of birds with modern large wind turbines. *Ardea*, 97 (3), 357–366. (in English)
- Lekuona, J. M., & Ursúa, C. (2007). Avian mortality in wind power plants of Navarra (northern Spain). In De Lucas, M., Janss, G. F. E., & Ferrer, M. (Eds.), *Birds and Wind Power: risk assessment and mitigation* (pp. 177-192). Madrid: Quercus Editions. Retrieved from <http://www.vliz.be/en/imis?module=ref&refid=111975&printversion=1&dropIMISitle=1>. (in English)
- Lowther, S. (2000). The European Perspective: Some Lessons from Case Studies. In *Proceedings of National Avian-Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California, May 1998* (pp. 110–114). Retrieved from https://nationalwind.org/wp-content/uploads/assets/research_meetings/Research_Meeting_III_Proceedings.pdf. (in English)
- May, R., Hoel, P. L., Langston, R., Dahl, E. L., Bevanger, K., Reitan, O., Nygård, T., Pedersen, H. C., Røskaft, E., & Stokke, B. G. (2010). *Collision risk in white-tailed eagles. Modelling collision risk using vantage point observations in Smøla wind-power plant. NINA Report 639*. Retrieved from <http://www.nina.no/archive/nina/PppBasePdf/rappport/2010/639.pdf>. (in English)
- Morinha, F., Travassos, P., Seixas, F., Martins, A., Bastos, R., Carvalho, D., Magalhães, P., Santos, M., Bastos, E., & Cabral, J. A. (2014). Differential mortality of birds killed at wind farms in Northern Portugal. *Bird Study*, 61 (2), 255-259. DOI: [10.1080/00063657.2014.883357](https://doi.org/10.1080/00063657.2014.883357). (in English)
- Powlesland, R. G. (2009). *Impacts of wind farms on birds: a review*. The Terrace Wellington, New Zealand: Publishing Team Department of Conservation. Retrieved from <https://www.doc.govt.nz/Documents/science-and-technical/sfc289entire.pdf>. (English)
- Scottish Natural Heritage. (2014). *Guidance. Recommended bird survey methods to inform impact assessment of onshore wind farms*. Retrieved from <https://www.nature.scot/sites/default/files/2017-09/Guidance%20note%20-%20Recommended%20bird%20survey%20methods%20to%20inform%20impact%20assessment%20of%20onshore%20windfarms.pdf>. (in English)
- Sugimoto, H., & Matsuda, H. (2011). Collision risk of White-fronted geese with wind turbines. *Ornithological Science*, 10 (1), 61-71. DOI: <https://doi.org/10.2326/osj.10.61>. (in English)
- Winkelman, J. E. (1992). *De invloed van de Sep-proefwindcentrale te Oosterbierum (Fr.) op vogels, 1: aanvaringsslachtoffers*. RIN-rapport 92/2. Arnhem, Netherlands: DLO-Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek. (in Dutch)