УДК 598.2:504.06:620.9
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.14

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ МОДЕЛІ ПОТЕНЦІЙНОГО КОЛІЗІЙНОГО РИЗИКУ ОРНІТОФАУНИ У ГІРСЬКИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ РАЙОНАХ

Морозова Т.В. (orcid.org/0000-0003-4836-1035),
orcid.org/0009-0009-9991-1106
Ковган Я.О. (orcid.org/0009-0000-7691-7833),
Герасименко М.В. (orcid.org/0009-0009-9991-1106)
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського, 35/2, 02000, Київ
erdu@urk.net

Розвиток вітроенергетики у гірських районах потребує методів оцінювання потенційного впливу на орнітофауну, які враховують просторову, висотну та часову неоднорідність польотної активності. Застосування традиційних підходів до Collision Risk Model (CRM) у багатьох випадках грунтується на агрегованих характеристиках польотної активності і не завжди забезпечує простежуваний перехід від польових спостережень до локалізованого визначення умов потенційної колізійної взаємодії. Метою роботи є обґрунтування методичних засад просторово-часової параметризації потенційного колізійного ризику орнітофауни у гірських вітроенергетичних районах та формування структури інтегрованої просторово-часової моделі ІПБМ-КР.

Методологічну основу становили системний і просторово-часовий підходи, аналіз методів польового обліку, радарних і GPS/GSM-спостережень, GIS-моделювання та Collision Risk Model, а також концептуалізація взаємозв'язків між характеристиками польотної активності, експозицією та потенційним ризиком. Сформовано послідовність X→S→T→M→B→E→C→R, у якій первинні емпіричні дані трансформуються через просторову, часову, метеорологічну та поведінкову характеристики у показник потенційної експозиції E, що визначає умови для подальшого механістичного моделювання колізійної взаємодії C та потенційного ризику R. Обґрунтовано поняття просторово-часового вікна потенційного колізійного ризику як локалізованої комбінації просторових, висотних, часових, метеорологічних і поведінкових умов, за яких експозиція птахів до небезпечної зони функціонування вітроенергетичної установки зростає.

Встановлено принципове методичне розмежування експозиції, колізійної взаємодії та ризику, що унеможливлює безпосереднє ототожнення високої польотної активності з високою ймовірністю зіткнення. Структура ІПБМ-КР забезпечує інтеграцію даних різної просторової, висотної та часової роздільності та визначає місце CRM як механістичного компонента в ієрархічній системі оцінювання. Сформована модель створює основу для GIS-реалізації, кількісної параметризації окремих компонентів і подальшої емпіричної валідації на матеріалах гірських екосистем. *Ключові слова:* вітроенергетика, орнітофауна, потенційний колізійний ризик, експозиція, просторово-часова параметризація, *Collision Risk Model*, GIS-моделювання, гірські екосистеми.

Spatiotemporal parameterization of a potential collision risk model for bird fauna in mountainous wind energy areas. Morozova T., Kovhan Ya., Herasymenko M.

The development of wind energy in mountainous areas requires methods for assessing potential impacts on avifauna that account for the spatial, altitudinal, and temporal heterogeneity of flight activity. The conventional application of the Collision Risk Model (CRM) is largely based on aggregated flight characteristics and does not always provide a traceable transition from field observations to the localized identification of conditions for potential collision interactions. The aim of this study is to substantiate methodological principles for the spatiotemporal parameterization of potential collision risk to avifauna in mountainous wind energy areas and to develop the structure of an Integrated Spatiotemporal Avian Collision Risk Model (ISTACRM).

The methodological framework comprised systems and spatiotemporal approaches, analysis of field survey methods, radar and GPS/GSM observations, GIS modelling, and the Collision Risk Model, as well as conceptualization of the relationships among flight activity characteristics, exposure, and potential risk. A sequential framework, X→S→T→M→B→E→C→R, was established, in which primary empirical data are transformed through spatial, temporal, meteorological, and behavioral characteristics into a measure of potential exposure E, which defines the conditions for subsequent mechanistic modelling of collision interaction C and potential risk R. The concept of a spatiotemporal potential collision-risk window was substantiated as a localized combination of spatial, altitudinal, temporal, meteorological, and behavioral conditions under which birds' exposure to the hazardous operating zone of a wind turbine increases.

A fundamental methodological distinction was established between exposure, collision interaction, and risk, thereby preventing the direct equating of high flight activity with a high probability of collision. The ISTACRM structure enables the integration of data with different spatial, altitudinal, and temporal resolutions and defines the role of CRM as a mechanistic component within a hierarchical assessment framework. The proposed model provides a basis for GIS implementation, quantitative parameterization of individual components, and subsequent empirical validation using data from mountainous ecosystems. *Key words:* wind energy, avifauna, potential collision risk, exposure, spatiotemporal parameterization, *Collision Risk Model*, GIS modelling, mountainous ecosystems.

© Бондар О.І., Іваненко І.Б., Шевченко Р.Ю., Лисюк О.Г., Аліменко О.Ю., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Вступ. Розвиток вітроенергетики є одним із важливих напрямів декарбонізації енергетичного сектору, однак просторове розширення вітроенергетичної інфраструктури зумовлює необхідність кількісного оцінювання її потенційного впливу на біорізноманіття. Для орнітофауни основними механізмами такого впливу є загибель унаслідок зіткнення з турбінами, уникнення вітроенергетичних об'єктів і пов'язані з ним зміни маршрутів польотів, бар'єрний ефект та опосередкована трансформація придатності місць існування. Інтенсивність і просторово-часова вираженість цих ефектів істотно варіюють залежно від видової специфіки, особливостей ландшафту, сезону, метеорологічних умов і характеристик конкретного вітроенергетичного об'єкта [1–5]. Це зумовлює необхідність переходу від узагальнених показників присутності або чисельності птахів до кількісного врахування фактичного використання ними повітряного простору.

Особливого значення ця проблема набуває у гірських районах, де орографічні умови формують складну просторову структуру повітряних потоків, термічних висхідних потоків і локальних коридорів переміщення птахів. Рельєф також визначає висотний розподіл польотів та його часову мінливість. Унаслідок цього навіть у межах одного вітроенергетичного району інтенсивність і характер використання повітряного простору можуть істотно відрізнятися між ділянками, висотними рівнями, сезонами та окремими періодами спостережень. Відповідно, просторове розміщення турбін саме по собі не є достатньою характеристикою потенційної взаємодії з орнітофауною.

Сучасні дослідження дедалі більше орієнтуються на просторово-явне та тривимірне представлення польотної активності. GPS-телеметрія, радарні спостереження, моделювання висоти польоту та GIS-аналіз дають змогу враховувати не лише горизонтальне положення траєкторій, а й їх висотну структуру та часову динаміку [6–10]. Принципове значення має врахування третього виміру, оскільки горизонтальне перекриття траєкторій птахів із територією розміщення турбін не свідчить про їх перекриття із площиною обертання ротора. Khosravifard et al. [6] показали, що ігнорування висотної компоненти може призводити до суттєвого викривлення характеристики потенційної експозиції. Водночас відмінності між методами визначення висоти польоту, зокрема GPS-вимірюваннями та альтиметричними оцінками, можуть безпосередньо впливати на результати розрахунку колізійного ризику [9, 10].

Одним із основних інструментів кількісного прогнозування потенційних зіткнень є Collision Risk Model (CRM). Її застосування передбачає поєднання характеристик польотної активності птахів із геометричними та операційними параметрами турбін і параметрами уникнення. Водночас аналіз розвитку CRM свідчить про значну різноманітність модельних конструкцій, відмінності вихідних припущень та обмежену кількість незалежних емпіричних валідацій [11]. Методичні рекомендації щодо застосування CRM наголошують на необхідності врахування інтенсивності або чисельності польотів, висоти польоту, тривалості перебування в зоні потенційної взаємодії, характеристик турбін, операційного часу та поведінки птахів, зокрема параметрів уникнення [12, 13]. Отже, результативність CRM безпосередньо залежить від якості, просторової та часової деталізації вхідних даних.

Водночас окремі компоненти цієї інформації часто отримують різними методами та з різною просторовою, висотною і часовою роздільністю. Польові візуальні спостереження характеризують фактичну польотну активність у визначених пунктах і часових інтервалах, GPS-телеметрія забезпечує траєкторні дані окремих особин, радарні системи дають змогу реєструвати переміщення у просторі та за висотою, а GIS-моделювання забезпечує їх просторову інтеграцію. За відсутності єдиної методичної конструкції результати таких спостережень можуть залишатися набором взаємопов'язаних, але недостатньо інтегрованих показників. Особливо складною ця проблема є для гірських територій, де просторові, висотні, часові, метеорологічні та поведінкові фактори мають виражену взаємозалежність.

Важливим напрямом розвитку таких підходів є просторово-явне моделювання експозиції. Дослідження мігруючого сокола-кібчика показали, що рівень експозиції до вітроенергетичних установок може істотно змінюватися протягом річного циклу та між географічними регіонами [16]. Просторові моделі також демонструють залежність потенційної експозиції від просторового розподілу птахів, характеристик їх польотів і розміщення турбін [15, 16, 29]. Водночас геометричні характеристики турбін, зокрема діаметр ротора та висота його нижньої точки, визначають величину вертикального перекриття з польотами птахів і, відповідно, можуть змінювати потенційну експозицію [17, 18].

Таким чином, наявна методична база містить окремі інструменти для опису польотної активності, просторового та висотного розподілу птахів, метеорологічних умов, поведінки та механістичного моделювання зіткнень, однак потребує їх послідовної інтеграції. Науково-методична проблема полягає у формуванні прозорого переходу від первинних емпіричних даних про використання повітряного простору до просторово й часово локалізованої характеристики експозиції, а від неї – до механістичного оцінювання колізійної взаємодії та потенційного ризику. Такий підхід дає змогу не ототожнювати високу інтенсивність польотів із високою ймовірністю зіткнення, оскільки експозиція характеризує умови потенційного контакту, тоді як ризик залежить також від геометрії взаємодії та поведінкової відповіді птахів.

Саме на такому розмежуванні ґрунтується авторська інтегрована просторово-часова багаторівнева модель ІПБМ-КР, структурована як послідовність X→S→T→M→B→E→C→R, де X – первинні емпіричні дані; S – просторова компонента; T – часова компонента; M – метеорологічні умови; (B) – поведінкові характеристики; E – потенційна експозиція; C – потенційна колізійна взаємодія; R – потенційний колізійний ризик. Така структура визначає логіку послідовної трансформації неоднорідних польових даних у просторово-часову характеристику умов потенційної взаємодії та встановлює місце CRM у загальній системі оцінювання.

Метою роботи є обґрунтування методичних засад інтегрованого просторово-часового оцінювання потенційного колізійного ризику орнітофауни у гірських вітроенергетичних районах та формування авторської інтегрованої просторово-часової багаторівневої моделі ІПБМ-КР, яка забезпечує послідовне поєднання емпіричних даних про використання повітряного простору з просторовими, висотними, часовими, метеорологічними та поведінковими характеристиками і визначає їх роль у формуванні показників експозиції та подальшому механістичному моделюванні потенційної колізійної взаємодії.

Матеріали та методи. *Загальна методологічна конструкція.* Дослідження має теоретико-методологічний характер і спрямоване на формування інтегрованої просторово-часової конструкції оцінювання потенційного колізійного ризику орнітофауни у гірських вітроенергетичних районах. Методологічну основу становить системний підхід до аналізу взаємодії трьох функціонально пов'язаних компонентів: орнітофауна → повітряний простір → вітроенергетична інфраструктура.

У межах цієї конструкції потенційний колізійний ризик розглядається не як безпосередня властивість території або окремої вітротурбіни, а як результат просторово-часової взаємодії характеристик польотної активності птахів, умов середовища та геометричних і операційних параметрів вітроенергетичної інфраструктури. Такий підхід передбачає послідовне розмежування характеристик використання повітряного простору, потенційної експозиції, колізійної взаємодії та потенційного ризику.

Інформаційну основу методичного аналізу становили наукові публікації 2020–2026 рр., присвячені оцінюванню впливу вітроенергетики на орнітофауну, моделюванню колізійного ризику, просторовій і висотній структурі польотів, GPS/GSM-телеметрії, радарному та автоматизованому виявленню птахів, просторовому плануванню вітроенергетичних об'єктів і післябудівельному моніторингу, а також актуальні методичні рекомендації щодо застосування Collision Risk Model (CRM) [11–13].

У дослідженні поєднано взаємопов'язані методичні підходи: системний – для представлення потенційного колізійного ризику як результату взаємодії просторових, часових, середовищних, поведінкових і техногенних чинників; просторово-часовий – для формалізації неоднорідності використання повітряного простору за координатами, висотою та часом; порівняльно-аналітичний – для визначення функціональних можливостей, сфери застосування та обмежень різних методів отримання даних про польоти; концептуального моделювання – для формування структури інтегрованої просторово-часової багаторівневої моделі ІПБМ-КР; GIS-інтеграційний – для просторового поєднання різнорідних даних про польоти, рельєф, метеорологічні умови та характеристики вітроенергетичної інфраструктури; механістичного моделювання – для включення CRM як окремого компонента переходу від характеристики експозиції до потенційної колізійної взаємодії.

Просторово-часова параметризація польотної активності. Для характеристики потенційного колізійного ризику принциповим є перехід від бінарної характеристики «наявність виду» до кількісного опису фактичного використання повітряного простору. У межах ІПБМ-КР положення польоту репрезентується щонайменше тривимірним вектором координат p = (x,y,z), де x і y характеризують горизонтальне положення, а z – висоту польоту.

З урахуванням часової компоненти просторове використання повітряного простору набуває вигляду p(t) = (x,y,z,t). Така репрезентація дає змогу характеризувати не лише факт перебування птаха на певній території, а й просторово-часову структуру його переміщення, включаючи висоту, тривалість і часову локалізацію польоту. Для врахування контексту формування польотної активності просторово-часовий опис доповнюється метеорологічними та поведінковими характеристиками: P = (x,y,z,t,M,B), де M – вектор метеорологічних умов, а B – вектор поведінкових характеристик польоту.

До метеорологічних параметрів залежно від доступності даних можуть належати швидкість і напрямок вітру, температура, опади, видимість та інші характеристики, здатні впливати на просторово-часову структуру польотів. Поведінковий компонент може включати тип польоту, напрямок переміщення, маневрування, використання висхідних потоків, реакцію на турбіну та характеристики уникнення.

Для гірських територій така багатовимірна репрезентація має принципове значення, оскільки один і той самий вид може використовувати різні просторові маршрути та висотні рівні залежно від сезону, часу доби, метеорологічних умов, напрямку повітряних потоків і морфології рельєфу. Отже, просторово-часова параметризація має враховувати не лише координати спостереження, а й умови, за яких формується конкретна структура польотної активності.

Потенційна експозиція як проміжна ланка моделі. У роботі потенційна експозиція визначається

як просторово-часове перекриття між фактичним використанням повітряного простору птахами та просторово визначеною зоною потенційної взаємодії з вітроенергетичною установкою.

Концептуально експозицію можна представити функцією:

E = f(S,T,M,B,G), де S – просторові характеристики польоту, T – часові характеристики, M – метеорологічні умови, B – поведінкові характеристики, G –техногенно-геометричні характеристики ВЕУ.

Техногенно-геометричний компонент G є наскрізним параметром просторової інтеграції, який не виділяється як окремий рівень послідовності X→S→T→M→B→E→C→R, але входить до функції формування E та механістичного переходу E→C.

За такого підходу експозиція характеризує можливість потенційного контакту птахів із небезпечною зоною функціонування турбіни, але не є еквівалентом фактичного зіткнення або колізійного ризику. Наявність птахів у межах горизонтальної проєкції турбіни або навіть їх перебування на висоті ротора сама по собі не означає зіткнення. Для переходу від експозиції до потенційної колізійної взаємодії необхідно враховувати геометрію траєкторії та ротора, розміри й швидкість птахів, швидкість обертання та характеристики ротора, операційний режим турбіни, а також поведінкову відповідь птахів і ймовірність уникнення.

Отже, в ІПБМ-КР експозиція виконує роль проміжної аналітичної ланки, яка поєднує характеристику використання повітряного простору з механістичним моделюванням потенційної колізійної взаємодії.

Концептуалізація переходу від експозиції до потенційного ризику. Для формалізації логічного переходу від експозиції до потенційного ризику використано спрощене концептуальне співвідношення: $R = N \cdot Pc \cdot (1-A)$, де N – інтенсивність або кількість польотів у зоні потенційної взаємодії; P_c – умовна ймовірність зіткнення за відсутності уникнення; A – ймовірність уникнення; R – очікувана величина потенційної колізійної взаємодії.

Це співвідношення не є повним математичним записом стандартної процедури Band CRM і не використовується в роботі як її заміна. Його призначення полягає у формалізації принципової структури переходу від характеристики експозиції до потенційної колізійної взаємодії: за однакової інтенсивності польотів зміна геометричних параметрів взаємодії або поведінкової відповіді птахів може змінювати очікувану величину потенційної взаємодії.

Повна процедура CRM передбачає послідовне врахування інтенсивності польотів, частки польотів у зоні ротора, геометричних характеристик турбіни, параметрів руху птахів і лопатей, операційного часу, параметрів уникнення та пов'язаних із ними джерел невизначеності [11–13]. Тому в межах запропонованої ІПБМ-КР CRM розглядається як механістичний компонент фінального переходу від параметризованої експозиції до потенційної колізійної взаємодії та ризику, а не як тотожна всій інтегрованій моделі конструкція.

Формування авторської моделі ІПБМ-КР. Центральним методичним результатом дослідження є інтегрована просторово-часова багаторівнева модель потенційного колізійного ризику ІПБМ-КР, яка забезпечує послідовне перетворення неоднорідних емпіричних даних про використання повітряного простору орнітофауною у просторово й часово локалізовану характеристику потенційної експозиції та її подальше використання у механістичному моделюванні колізійної взаємодії.

Загальну структуру ІПБМ-КР формалізовано послідовністю:

X→S→T→M→B→E→C→R, (1), де X – первинні емпіричні дані про орнітофауну та використання повітряного простору; S – просторова структура переміщень, включаючи їх тривимірну локалізацію; T – часова структура польотної активності; M – метеорологічні умови; B – поведінкові характеристики птахів; E – потенційна експозиція до взаємодії з вітроенергетичною установкою; C – параметри потенційної колізійної взаємодії; R – потенційний колізійний ризик.

Принциповою особливістю моделі є послідовне функціональне розмежування етапів формування ризику. Первинні дані X структуруються за просторовою S та часовою TT компонентами, доповнюються метеорологічним M і поведінковим B контекстом. Їх інтеграція з геометричними та операційними характеристиками вітроенергетичної установки формує показник потенційної експозиції E. На наступному етапі E використовується як вхідна характеристика для механістичного моделювання потенційної колізійної взаємодії C, результатом якого є характеристика потенційного ризику R.

Таким чином, ІПБМ-КР не замінює CRM, а визначає структуру та послідовність підготовки й інтеграції даних, необхідних для її застосування. Водночас модель чітко розмежовує експозицію як характеристику потенційного просторово-часового перекриття та колізійний ризик як результат подальшого врахування механістичних і поведінкових параметрів взаємодії.

Методологічна декомпозиція потенційного колізійного ризику. Сформована модель ґрунтується на взаємодії п'яти функціональних груп характеристик: просторових, часових, метеорологічних, поведінкових та техногенно-геометричних. Просторовий компонент S характеризує положення та структуру використання повітряного простору, включаючи горизонтальні координати, висоту польоту, маршрути переміщення, місця концентрації та функціональні ділянки. Висота z при цьому розглядається як складова тривимірної просторової локалізації, а не як окремий рівень моделі. Часовий компонент

T характеризує сезонну, добову та погодинну динаміку польотної активності, а також тривалість перебування птахів у потенційно небезпечних просторових і висотних інтервалах.

Метеорологічний компонент M охоплює характеристики умов, здатних змінювати просторово-часову структуру польотів, зокрема напрям і швидкість вітру, видимість, опади, хмарність та інші релевантні параметри. Для гірських територій їх значення визначається також взаємодією з орографічними особливостями та локальними повітряними потоками.

Поведінковий компонент B охоплює тип і характер польоту, маневрування, напрямок переміщення, використання висхідних потоків, реакцію на вітроенергетичні установки та параметри уникнення.

Техногенно-геометричний компонент характеризує просторову конфігурацію потенційної взаємодії та включає координати й висоту турбіни, діаметр ротора, висоту його нижньої та верхньої точок обертання, операційний режим та інші параметри, необхідні для механістичного моделювання [18, 30].

Отже, у межах ІПБМ-КР просторові та часові характеристики визначають де і коли відбувається використання повітряного простору, метеорологічні та поведінкові – за яких умов і яким чином реалізується політ, а техногенно-геометричні – у яких просторових і висотних межах може виникати потенційна взаємодія з вітроенергетичною установкою. Їх інтеграція формує основу для кількісної характеристики потенційної експозиції EE.

Послідовність (1) відображає не просту сукупність чинників, а функціональний ланцюг підготовки та трансформації даних. На першому етапі первинні спостереження X переводяться у просторово локалізовану характеристику використання повітряного простору S. Часова компонента T визначає періоди та тривалість такого використання, тоді як M і B характеризують умови та спосіб реалізації польотної активності. Інтеграція цих компонентів із геометричними характеристиками вітроенергетичної установки формує характеристику потенційної експозиції E. Лише після цього стає можливим перехід до механістичного визначення параметрів колізійної взаємодії C та потенційного ризику R.

Таким чином, ІПБМ-КР не є альтернативою CRM і не замінює її розрахункових процедур. Модель визначає структуру та послідовність підготовки вхідних даних, необхідних для коректного застосування механістичного моделювання колізійної взаємодії. У цьому полягає її принципова відмінність від CRM як окремого розрахункового інструменту.

Використання генеративного штучного інтелекту. Під час підготовки рукопису використано інструмент генеративного штучного інтелекту ChatGPT (OpenAI) для мовного редагування та вдосконалення структури тексту, уточнення формулювань, логічного структурування матеріалу та методологічного обговорення окремих положень дослідження. Наукова концепція, методологічні рішення, інтерпретація результатів, добір і перевірка наукових джерел та остаточний зміст рукопису визначені й критично перевірені автором. Автори несуть повну відповідальність за достовірність, наукову обґрунтованість і зміст представленого матеріалу.

Результати досліджень. *Методологічна декомпозиція потенційного колізійного ризику.* Проведений методологічний аналіз показав, що формування потенційної колізійної небезпеки у гірських вітроенергетичних районах визначається взаємодією щонайменше п’яти функціональних груп характеристик: просторових, часових, метеорологічних, поведінкових і техногенно-геометричних. *Просторові характеристики* визначають положення та структуру використання повітряного простору, включаючи горизонтальні координати, висоту польоту, маршрути переміщення, місця концентрації та функціональні ділянки. У тривимірному представленні висота z є складовою просторового положення, тому не розглядається як незалежний від просторового компонент. *Часові* – визначають сезонну, добову та погодинну динаміку польотної активності, а також тривалість перебування птахів у потенційно небезпечних просторових і висотних інтервалах. *Метеорологічні* – описують умови, здатні змінювати просторово-часову структуру польотів: напрям і швидкість вітру, видимість, опади, хмарність та інші релевантні параметри. Для гірських територій їх значення посилюється взаємодією з орографічними особливостями та формуванням локальних повітряних потоків. *Поведінкові* – охоплюють тип і характер польоту, маневрування, використання висхідних потоків, напрямок переміщення, реакцію на вітроенергетичні установки та параметри уникнення. *Техногенно-геометричні* – визначають просторову конфігурацію потенційної взаємодії та включають координати й висоту турбіни, діаметр ротора, висоту нижньої та верхньої точок його обертання, операційний режим та інші параметри, необхідні для механістичного моделювання.

Таке структурування уточнює причинний механізм формування ризику. Просторова і часова компоненти визначають де і коли відбувається використання повітряного простору; метеорологічна та поведінкова – за яких умов і яким чином реалізується політ; техногенно-геометрична – наскільки просторово та висотно цей політ може перекриватися із зоною функціонування ротора. Їх інтеграція формує передумови для кількісної характеристики потенційної експозиції.

Сучасні емпіричні дослідження підтверджують необхідність такого багаторівневого представлення. Therkildsen et al. [7] продемонстрували зміни траєкторій польоту великих птахів після спорудження високих вітротурбін, що свідчить про значення поведінкової відповіді та просторової перебудови польотів. Johnston et al. [9] встановили, що метод визначення

висоти польоту може впливати на результати моделювання колізійного ризику. Schaub et al. [18] показали видоспецифічний характер взаємозв'язку між висотою польоту, геометрією турбін та модельованою ймовірністю зіткнення. Нові GPS-дослідження також підтверджують значення геометричних характеристик ротора, зокрема його діаметра та висоти нижньої точки обертання, для величини потенційного перекриття з польотами птахів [17].

Отже, потенційний колізійний ризик не може бути адекватно представлений одним просторовим показником, середньою інтенсивністю польотів або фактом присутності виду в межах території вітроенергетичного об'єкта. Його методично коректне представлення потребує послідовного врахування просторової, часової, метеорологічної, поведінкової та техногенно-геометричної компонент.

Структура ІПБМ-КР. На основі проведеного методологічного аналізу сформовано восьмирівневу конструкцію ІПБМ-КР. Її принциповою особливістю є розмежування характеристик польотної активності, умов потенційної експозиції та механістичних параметрів колізійної взаємодії.

Відповідно до моделі, первинні емпіричні дані X не переходять безпосередньо у показник ризику. Вони послідовно структуруються за просторовою S та часовою T координатами, доповнюються метеорологічним M і поведінковим B контекстом, після чого інтегруються з геометрією та операційними характеристиками вітротурбіни для визначення потенційної експозиції E. На наступному етапі параметри експозиції використовуються для механістичного моделювання потенційної колізійної взаємодії C, результатом якого є характеристика потенційного ризику R.

Таким чином, структура ІПБМ-КР забезпечує послідовне функціональне розмежування компонентів, які у традиційних спрощених підходах можуть бути агреговані в один показник. Її ключовим результатом є виділення експозиції EE як проміжної ланки між просторово-часовою характеристикою використання повітряного простору та механістичним моделюванням колізійної взаємодії.

Це дає змогу трактувати високий рівень польотної активності не як безпосередній доказ високого колізійного ризику, а як потенційну передумову його формування, величина якої залежить від просторового й висотного перекриття з небезпечною зоною, часових умов, характеристик турбіни та поведінкової відповіді птахів.

Просторово-часове вікно потенційної колізійної взаємодії. Для локалізації умов підвищеної потенційної експозиції у межах ІПБМ-КР введено поняття просторово-часового вікна потенційної колізійної взаємодії:

$$\mathrm{WCR} = \{(x, y, z, t): \mathrm{E}(x, y, z, t) \geq E_{thr}\}$$

де E_{thr} – заданий поріг (визначається на етапі практичної параметризації залежно від завдання та масштабу аналізу);
E(x,y,z,t) – значення потенційної експозиції;
WCR – множина просторово-часових умов, що відповідають або перевищують цей поріг.

На відміну від просторового поширення виду або окремої точки спостереження, характеризує сукупність просторових, часових, метеорологічних і поведінкових умов, за яких формується підвищена потенційна експозиція до взаємодії з вітроенергетичною установкою. При цьому W_{CR} не є територією гарантованого зіткнення і не може інтерпретуватися

Таблиця 1

Структура ІПБМ-КР та функціональне призначення її компонентів

Компонент	Зміст	Основні параметри	Функціональне призначення
X	первинні емпіричні дані	вид, кількість особин, реєстрації польотів, траєкторії, час спостереження, висота	формування вихідного масиву даних
S	просторова структура	x,y,z, маршрут, ділянка, відстань до турбіни	просторова локалізація польотної активності
T	часова структура	сезон, місяць, година, тривалість польоту	визначення часової неоднорідності експозиції
M	метеорологічний контекст	швидкість і напрям вітру, опади, видимість, хмарність	характеристика середовищних умов польоту
B	поведінкова структура	тип польоту, маневрування, напрямок, уникнення	характеристика поведінкової відповіді
E	потенційна експозиція	просторово-часове перекриття польотів із зоною потенційної взаємодії	кількісна характеристика можливості контакту
C	колізійна взаємодія	геометрія траєкторії та ротора, параметри руху, операційний режим	механістичне моделювання потенційного зіткнення
R	потенційний колізійний ризик	результат інтеграції експозиції, параметрів взаємодії та уникнення	узагальнення потенційної колізійної небезпеки

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

як карта фактичної смертності. Його функція полягає у виділенні просторово-часових умов, які потребують подальшого механістичного аналізу колізійної взаємодії.

Для гірських вітроенергетичних районів такий підхід має особливе значення, оскільки потенційно небезпечні умови можуть бути локалізовані не лише у горизонтальній площині навколо турбіни, а й у певному поєднанні висоти польоту, часу, метеорологічних умов і характеристик польотної поведінки.

Таким чином, W_{CR} є просторово-часовим представленням області підвищеної експозиції, яка може бути використана як вхідна область для подальшого механістичного моделювання колізійної взаємодії.

Просторова роль GIS. У межах ІПБМ-КР GIS розглядається не як самостійна модель потенційного колізійного ризику, а як середовище просторової інтеграції, локалізації та візуалізації різнорідних даних, необхідних для реалізації окремих компонентів моделі.

У GIS-середовищі можуть бути інтегровані: цифрова модель рельєфу; межі та геометричні характеристики вітроенергетичних об'єктів; місця концентрації птахів; маршрути та траєкторії переміщень; висотні характеристики польотів; типи оселищ; міграційні коридори; метеорологічні поля; результати просторово-часового розрахунку експозиції; просторовий розподіл параметрів потенційної колізійної взаємодії та ризику.

Функціонально GIS забезпечує просторову реалізацію компоненти S, інтеграцію її з іншими компонентами ІПБМ-КР та формування просторово явних представлень E, C і R. Отже, GIS у запропонованій конструкції виступає інфраструктурним рівнем моделі, що поєднує первинні просторові дані, результати їх інтеграції та вихідні картографічні продукти. У цій роботі R розглядається як вихідна характеристика ієрархічної структури моделі, тоді як конкретна функціональна форма її кількісного розрахунку залежить від параметризації механістичного компонента C та не визначається як універсальна функція в межах цієї методологічної конструкції.

Сучасні просторові дослідження підтверджують доцільність просторово явного представлення ризику. Моделі просторового ризику для морських птахів продемонстрували можливість локалізації зон підвищеного ризику на локальному масштабі [8, 29], тоді як великомасштабні GPS-дослідження дали змогу визначати території підвищеної чутливості птахів до взаємодії з енергетичною інфраструктурою [10, 16]. Просторово явні моделі також можуть бути співвіднесені з довгостроковими даними смертності, що створює можливості для перевірки відповідності модельованих зон фактичним просторовим патернам загибелі [15].

Висотний компонент просторової структури. Для гірських вітроенергетичних районів висотна структура польотів є критичною характеристикою просторового використання повітряного простору. У межах ІПБМ-КР вона не виділяється в окремий незалежний рівень, а розглядається як третя координата просторової компоненти S: p=(x,y,z), де z характеризує висоту польоту. Для зіставлення висотної структури польотів із геометрією вітроенергетичної установки доцільно визначати: $H_b=z_b$,, де H_b – висота польоту птаха, та $H_r=[H_{min}, H_{max}]$, де H_r – діапазон висот, у межах якого розташована площина обертання ротора.

Потенційна висотна експозиція виникає за умови: $H_b \in H_r$. Однак просте висотне перекриття не є достатньою умовою для встановлення колізійної взаємодії. Воно не враховує горизонтальне положення птаха відносно ротора, напрямок і швидкість його руху, параметри траєкторії, поведінкове уникнення та операційний режим вітроенергетичної установки.

Тому висота польоту використовується як просторовий параметр експозиції EE, тоді як її перехід у характеристики колізійної взаємодії C потребує врахування повної просторової геометрії траєкторії та ротора.

Часовий компонент. Потенційна експозиція є динамічною характеристикою, просторовий прояв якої змінюється у часі залежно від сезону, часу доби, фази міграції та метеорологічних умов. Дослідження довгострокової смертності свідчать про виражену сезонність загибелі птахів [19]. Для окремих груп максимальна кількість смертей припадає на міграційні періоди, тоді як для осілих видів сезонна структура може бути іншою. У дослідженні малого дрохва також встановлено суттєві відмінності польотної активності між сезонами, статями та часом доби [20].

Отже, усереднення польотної активності за рік може маскувати короткочасні періоди підвищеної експозиції, особливо за умов міграційних переміщень або специфічних метеорологічних ситуацій.

У межах ІПБМ-КР пропонується використовувати щонайменше три рівні часової деталізації: $T=\{T_{season},T_{day},T_{event}\}$, де T_{season} – сезонна структура, T_{day} – добова структура, а T_{event} – подієва структура, пов'язана з конкретними погодними, міграційними або іншими екологічно значущими умовами. Така декомпозиція дає змогу перейти від середньостатистичної характеристики польотної активності до виявлення часових інтервалів концентрації потенційної експозиції, які надалі можуть бути використані у механістичному моделюванні.

Поведінковий компонент. Поведінка птахів є одним із ключових джерел невизначеності під час переходу від потенційної експозиції до колізійної взаємодії. Вона визначає, якою мірою просторово-часове перекриття траєкторії польоту із потенційною зоною взаємодії трансформується у фактичне наближення до ротора або його уникнення. Сучасні дослідження демонструють видоспецифічність поведінкових характеристик та їх залежність від метеорологічних

і часових факторів [25]. Автоматизовані системи спостереження та тривимірне відстеження траєкторій створюють можливості для кількісного визначення параметрів польоту, зміни траєкторії та поведінкового уникнення [23]. У зв'язку з цим компонент B у ІПБМ-КР не є лише контекстною характеристикою. Він бере участь у параметризації переходу від експозиції E до колізійної взаємодії C, зокрема через характеристики траєкторії, маневрування, напрямку руху та уникнення вітроенергетичної установки.

Таким чином, просторові, часові та поведінкові характеристики не трактуються як незалежні фактори ризику, що механічно додаються один до одного. Вони формують взаємопов'язану систему параметрів, яка визначає коли, де та за яких умов виникає потенційна експозиція, тоді як механістичний блок визначає подальші умови її трансформації у потенційну колізійну взаємодію.

Обговорення.

Сформована ІПБМ-КР розвиває підхід до аналізу впливу вітроенергетики на орнітофауну від статичного просторового представлення до просторово-часової та поведінково орієнтованої структури аналізу, у якій потенційний колізійний ризик розглядається як результат послідовної інтеграції характеристик використання повітряного простору, умов середовища, поведінки птахів і геометрично-операційних параметрів вітроенергетичних установок.

Принциповим положенням ІПБМ-КР є розмежування потенційної експозиції, колізійної взаємодії та ризику. Експозиція характеризує просторово-часову можливість потенційного контакту птаха з функціональною зоною вітроенергетичної установки, але сама по собі не свідчить про виникнення колізії. Для переходу від експозиції до характеристики потенційної колізійної взаємодії необхідне додаткове врахування просторової геометрії траєкторії, параметрів руху птаха та ротора, режиму роботи установки, а також поведінкового уникнення. Відповідно, високий рівень польотної активності або саме перебування птаха у висотному діапазоні ротора не може автоматично трактуватися як високий колізійний ризик.

Таке розмежування узгоджується із сучасними просторовими підходами, у яких спочатку встановлюється ступінь просторового перекриття використання повітряного простору птахами з розташуванням або функціональною зоною вітроенергетичних об'єктів, після чого здійснюється перехід до характеристики потенційної смертності або ризику [14–16]. Для мігруючих хижих птахів показано, що характер потенційної експозиції може істотно змінюватися протягом річного циклу, тому характеристика ризику лише за місцем розташування гніздових або кормових територій не відображає всієї просторово-часової структури взаємодії [16]. У цьому контексті ІПБМ-КР акцентує не лише на тому, де присутній вид, а на тому, де, коли та за яких умов він фактично використовує повітряний простір.

Другою принциповою особливістю є інтеграція вертикального виміру до просторової структури польотів. Для гірських територій це має особливе значення, оскільки орографічні та метеорологічні умови можуть формувати локальні потоки, що впливають на висоту та напрямок переміщення птахів. Тому двовимірне представлення просторового використання території без інформації про висоту може призводити як до переоцінювання, так і до недооцінювання потенційного перекриття траєкторій із площиною обертання ротора. Тривимірне моделювання та GPS-дані розширюють можливості виявлення таких просторових взаємодій [6, 9, 18, 30]. У ІПБМ-КР висота не виділяється як незалежний фактор, а є третьою координатою просторової компоненти SS, що забезпечує узгодження вертикальної структури польотів із геометрією вітроенергетичної установки.

Третім важливим положенням є врахування динамічної поведінки птахів. Птахи не є пасивними об'єктами потенційного ризику: їхні траєкторії можуть змінюватися залежно від просторового розташування інфраструктури, метеорологічних умов, характеристик польоту та індивідуально-видових особливостей. Дослідження великих птахів після спорудження турбін демонструють зміни траєкторій у безпосередній близькості до інфраструктури [7]. Дані GPS-трекінгу червоного шуліки також свідчать про зв'язок між просторовою геометрією турбіни та параметрами потенційної колізійної взаємодії [17], тоді як дослідження поведінки за різних погодних умов підтверджують варіабельність уникнення [25]. Отже, параметризація експозиції лише за геометричним перекриттям є недостатньою без урахування поведінкової відповіді. У запропонованій моделі компонент BB забезпечує зв'язок між характеристикою експозиції EE та параметрами механістичного блоку CC.

Четвертою особливістю є включення CRM до послідовної структури підготовки та інтеграції даних, а не його трактування як автономного джерела кінцевої характеристики ризику. Критичний аналіз розвитку моделей колізійного ризику вказує на значну різноманітність існуючих підходів і водночас на проблеми їх валідації, параметризації та стандартизації [11]. Тому сама математична складність CRM не гарантує підвищення достовірності результату. Його надійність значною мірою визначається якістю вхідних даних, відповідністю їх просторової та часової роздільності досліджуваному процесу, обґрунтованістю параметрів уникнення та врахуванням невизначеності.

У цьому відношенні ІПБМ-КР виконує організаційно-методичну функцію щодо CRM: вона визначає, які характеристики польотної активності та середовища мають бути локалізовані у просторі й часі, як вони інтегруються у характеристику експозиції та які дані необхідні для подальшого механістичного моделювання колізійної взаємодії. Таким

чином, модель не створює альтернативи CRM, а формує структурований інформаційний контур для його застосування. Це особливо важливо за умов неоднорідності польотних даних і значної просторово-часової варіабельності поведінки птахів.

П'ятою особливістю є багатомасштабність застосування моделі. На регіональному рівні ІПБМ-КР може бути використана для просторового зонування територій за потенційною експозицією та визначення ділянок, де подальше планування вітроенергетичного розвитку потребує поглибленого орнітологічного аналізу. На локальному рівні модель може застосовуватися для характеристики окремої вітроелектростанції, групи турбін або конкретних траєкторій польоту. На операційному рівні просторово-часова структура експозиції створює передумови для виявлення часових інтервалів підвищеної потенційної взаємодії, які в подальшому можуть розглядатися при розробленні адаптивних режимів експлуатації.

Такий багатомасштабний підхід узгоджується із сучасною практикою просторового планування, у межах якої одним із напрямів мінімізації потенційного впливу є уникнення територій із підвищеною чутливістю орнітофауни ще на етапі планування розміщення енергетичних об'єктів [26, 27]. Водночас відмінності у просторовому розподілі та рівнях потенційного впливу між видами й регіонами свідчать про обмеженість універсальних просторових оцінок, однаковою мірою застосовних до всіх видів або територій [13, 15, 16, 20, 21]. Саме тому ІПБМ-КР орієнтована на контекстну параметризацію, за якої просторові, часові, метеорологічні та поведінкові характеристики формуються відповідно до конкретної території та досліджуваної таксономічної групи [28].

Окремого розгляду потребує валідація моделі. Сформована конструкція є методологічною моделлю інтеграції просторово-часових даних і не повинна ототожнюватися з емпірично підтвердженою моделлю фактичної смертності. Перевірка її прогностичної спроможності потребує зіставлення модельованих зон потенційної експозиції та ризику з незалежними даними післябудівельного моніторингу, зокрема результатами систематичного пошуку загиблих птахів, автоматизованого виявлення польотів та, за можливості, GPS-трекінгу [15, 19, 24]. Дослідження, у яких просторові моделі ризику співвідносилися з довгостроковими даними смертності, демонструють принципову цінність такого підходу [15]. Стандартизовані протоколи застосування автоматизованих систем спостереження, своєю чергою, створюють методичну основу для отримання відтворюваних даних про траєкторії та поведінку птахів [23].

Водночас ІПБМ-КР має низку обмежень, які визначають межі її інтерпретації. По-перше, просторово-часова параметризація потребує достатнього обсягу та репрезентативності польотних даних; нерівномірність спостережень у просторі або часі може впливати на структуру модельованої експозиції. По-друге, достовірність вертикальної компоненти залежить від точності визначення висоти польоту. По-третє, параметри уникнення є потенційно видоспецифічними та можуть змінюватися залежно від умов середовища, характеристик турбіни та досвіду птахів. По-четверте, характеристика потенційного колізійного ризику не може безпосередньо інтерпретуватися як демографічний ефект на популяцію без окремого врахування чисельності популяції, продуктивності, вікової структури, просторової структури популяції та можливих компенсаторних механізмів.

Отже, основним методологічним результатом є не створення альтернативи існуючим CRM, а формування послідовного просторово-часового контуру переходу від первинних спостережень до механістичного моделювання потенційної колізійної взаємодії. Ключовою проміжною ланкою цього переходу є характеристика потенційної експозиції, сформована на основі тривимірного використання повітряного простору, часової структури польотів, метеорологічного контексту, поведінкових характеристик і геометрії вітроенергетичної установки. Така структура забезпечує прозоре розмежування того, що безпосередньо спостерігається, що моделюється як потенційна експозиція і що потребує подальшої механістичної параметризації. Для гірських вітроенергетичних районів це створює методичну основу для переходу від загальної характеристики присутності орнітофауни до просторово й часово локалізованого аналізу потенційної взаємодії з вітроенергетичною інфраструктурою.

Висновки. Обґрунтовано необхідність переходу від усереднених характеристик польотної активності до просторово-, висотно- та часово структурованого аналізу використання повітряного простору орнітофауною під час дослідження потенційного колізійного ризику у гірських вітроенергетичних районах.

Встановлено, що характеристика потенційного колізійного ризику потребує інтеграції просторових, часових, метеорологічних, поведінкових та техногенно-геометричних параметрів. При цьому висота польоту розглядається як складова тривимірної просторової структури, що забезпечує врахування вертикального виміру використання повітряного простору.

Обґрунтовано методичне розмежування потенційної експозиції, колізійної взаємодії та потенційного колізійного ризику. Потенційна експозиція характеризує просторово-часову можливість взаємодії птахів із функціональною зоною вітроенергетичної установки, тоді як характеристика колізійної взаємодії та ризику потребує додаткового врахування геометрії траєкторії, параметрів руху, операційних характеристик установки та поведінкового уникнення.

Сформовано інтегровану просторово-часову багаторівневу модель потенційного колізійного ризику ІПБМ-КР, яка встановлює послідовний зв'язок між

первинними емпіричними даними, просторовою та часовою структурою використання повітряного простору, метеорологічними й поведінковими характеристиками, потенційною експозицією та подальшим механістичним моделюванням колізійної взаємодії: X→S→T→M→B→E→C→R.

Сформовано поняття просторово-часового вікна потенційної колізійної взаємодії W_{CR} як локалізованої комбінації умов, за яких потенційна експозиція перевищує встановлений поріг. Водночас W_{CR} характеризує умови потенційної взаємодії, а не фактичну смертність чи гарантовану зону зіткнення.

Визначено функціональне місце CRM у складі ІПБМ-КР як механістичного компонента моделювання потенційної колізійної взаємодії та ризику. Сформована структура формує методичну основу для GIS-реалізації, територіальної параметризації та подальшої емпіричної перевірки моделі із використанням високоточних даних про траєкторії польотів, поведінкове уникнення та післябудівельний моніторинг.

Конфлікт інтересів: автор Морозова Т.В. є членом редакційної колегії журналу. Для забезпечення незалежності редакційного процесу рукопис розглядався редактором, який не мав конфлікту інтересів з автором. Автор не брав участі у відборі рецензентів, процесі рецензування та прийнятті рішення щодо публікації статті. Рукопис пройшов стандартну процедуру подвійного сліпого рецензування.

Література

1. Fernández-Bellon D. Limited accessibility and bias in wildlife-wind energy knowledge: A bilingual systematic review of a globally distributed bird group. Science of the Total Environment. 2020. Vol. 737. 140238. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140238.
2. Khosravifard S., Skidmore A. K., Naimi B., Venus V., Muñoz A. R., Toxopeus A. G. Identifying birds' collision risk with wind turbines using a multidimensional utilization distribution method. Wildlife Society Bulletin. 2020. Vol. 44, No. 1. P. 191–199. DOI: https://doi.org/10.1002/wsb.1056.
3. Choi D. Y., Wittig T. W., Kluever B. M. An evaluation of bird and bat mortality at wind turbines in the Northeastern United States. PLOS ONE. 2020. Vol. 15, No. 8. e0238034. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238034.
4. Silva J. P., et al. Bird displacement by wind turbines: Assessing current knowledge and recommendations for future studies. Birds. 2021. Vol. 2, No. 4. P. 460–475. DOI: https://doi.org/10.3390/birds2040034.
5. Therkildsen O. R., Balsby T. J. S., Kjeldsen J. P., Nielsen R. D., Bladt J., Fox A. D. Changes in flight paths of large-bodied birds after construction of large terrestrial wind turbines. Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 290. 112647. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112647.
6. Linder A. C., Lyhne H., Laubek B., Bruhn D., Pertoldi C. Modeling species-specific collision risk of birds with wind turbines: A behavioral approach. Symmetry. 2022. Vol. 14, No. 12. 2493. DOI: https://doi.org/10.3390/sym14122493.
7. Linder A. C., Lyhne H., Laubek B., Bruhn D., Pertoldi C. Quantifying raptors' flight behavior to assess collision risk and avoidance behavior to wind turbines. Symmetry. 2022. Vol. 14, No. 11. 2245. DOI: https://doi.org/10.3390/sym14112245.
8. Mikami K., Kazama K., Kazama M. T., Watanuki Y. Mapping the collision risk between two gull species and offshore wind turbines: Modelling and validation. Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 316. 115220. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115220.
9. Gauld J. G., Silva J. P., Atkinson P. W., et al. Hotspots in the grid: Avian sensitivity and vulnerability to collision risk from energy infrastructure interactions in Europe and North Africa. Journal of Applied Ecology. 2022. Vol. 59. P. 1496–1512. DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2664.14160.
10. Johnston D. T., Thaxter C. B., Boersch-Supan P. H., Davies J. G., Clewley G. D., Green R. M. W., Shamoun-Baranes J. Flight heights obtained from GPS versus altimeters influence estimates of collision risk with offshore wind turbines in Lesser Black-backed Gulls Larus fuscus. Movement Ecology. 2023. Vol. 11. 66. DOI: https://doi.org/10.1186/s40462-023-00431-z.
11. Nilsson A. L. K., Molværsmyr S., Breistøl A., et al. Estimating mortality of small passerine birds colliding with wind turbines. Scientific Reports. 2023. Vol. 13. 21365. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-46909-z.
12. Lloyd J. D., Butryn R., Pearman-Gillman S., Allison T. D. Seasonal patterns of bird and bat collision fatalities at wind turbines. PLOS ONE. 2023. Vol. 18, No. 5. e0284778. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284778.
13. Balotari-Chiebao F., Santangeli A., Piirainen S., Byholm P. Wind energy expansion and birds: Identifying priority areas for impact avoidance at a national level. Biological Conservation. 2023. Vol. 277. 109851. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109851.
14. Martin G. R., Banks A. N. Marine birds: Vision-based wind turbine collision mitigation. Global Ecology and Conservation. 2023. Vol. 42. e02386. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02386.
15. Morant J., Arrondo E., Sánchez-Zapata J. A., Donázar J. A., Margalida A., Carrete M., Blanco G., Guil F., Serrano D., Pérez-García J. M. Fine-scale collision risk mapping and validation with long-term mortality data reveal current and future wind energy development impact on sensitive species. Environmental Impact Assessment Review. 2024. Vol. 104. 107339. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107339.
16. Assandri G., Bazzi G., Bermejo-Bermejo A., et al. Assessing exposure to wind turbines of a migratory raptor through its annual life cycle across continents. Biological Conservation. 2024. Vol. 293. 110592. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110592.
17. Škrábal J., Raab M., Raab R., et al. Red kite (Milvus milvus) collision risk is higher at wind turbines with larger rotors and lower clearance, evidenced by GPS tracking. Biological Conservation. 2025. Vol. 312. 111482. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111482.
18. Schaub T., Klaassen R. H. G., De Zutter C., et al. Effects of wind turbine dimensions on the collision risk of raptors: A simulation approach based on flight height distributions. Science of the Total Environment. 2024. Vol. 954. 176551. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176551.

19. Ballester C., Dupont S. M., Corbeau A., Chambert T., Duriez O., Besnard A. A standardized protocol for assessing the performance of automatic detection systems used in onshore wind power plants to reduce avian mortality. Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 354. 120437. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120437.
20. Bretagnolle V., Merot A., Martineau A., Dedeban E., Chargé R., Debenest E. Wind turbine threats to bustards: Spatially explicit risk modelling from empirical data. Biological Conservation. 2025. Vol. 310. 111391. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111391.
21. Etard A., Jung M., Visconti P. Risk to European birds from collisions with wind-energy facilities. Biological Conservation. 2026. Vol. 319. 111875. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2026.111875.
22. Sandvig E. M., Saldanha S., Norambuena H. V. High collision vulnerability of Two-banded Plovers to wind turbines revealed by GPS tracking with probabilistic altitude modelling. Journal of Applied Ecology. 2026. Vol. 63, No. 7. e70487. DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2664.70487.
23. Mercker M., Škrábal J., Blew J., et al. Smart flying in challenging skies: How Red Kites adjust wind turbine micro- and meso-avoidance across weather and experience. Scientific Reports. 2026. Vol. 16. 12939. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-026-45894-3.
24. Yordanov N., Zehtindjiev P., Whitfield D. P. Long-term decline in bird collisions at operational wind farms: Evidence from systematic monitoring to support sustainable wind energy development (2010–2024). Sustainability. 2026. Vol. 18, No. 2. 992. DOI: https://doi.org/10.3390/su18020992.
25. Cook A. S. C. P., Salkanovic E., Masden E., Lee H. E., Kiilerich A. H. A critical appraisal of 40 years of avian collision risk modelling: How have we got here and where do we go next? Environmental Impact Assessment Review. 2025. Vol. 110. 107717. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107717.
26. NatureScot. Guidance on using an updated collision risk model to assess bird collision risk at onshore wind farms. NatureScot, 2024. DOI/URL не зазначається.
27. Band W. Using a collision risk model to assess bird collision risks for onshore wind farms. NatureScot Research Report 909. NatureScot, 2024.
28. NatureScot. Wind farm impacts on birds: Use of avoidance rates in the NatureScot Wind Farm Collision Risk Model. Version 4. NatureScot, September 2025.
29. Fauchald P., Ollus V. M. S., Ballesteros M., Breistøl A., Christensen-Dalsgaard S., Molværsmyr S., Tarroux A., Systad G. H., Moe B. Mapping seabird vulnerability to offshore wind farms in Norwegian waters. Frontiers in Marine Science. 2024. Vol. 11. 1335224. DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1335224.
30. Fritz E., Turrini M., Breuer J. Avian collision risk with reference wind turbines: Effects of geometry, operation, and flight height distribution. Applied Sciences. 2026. Vol. 16, No. 14. 7354. DOI: https://doi.org/10.3390/app16147354

Дата першого надходження статті до видання: 28.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026