УДК 598.2:620.9
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.7

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕНЬ ПТАХІВ ІЗ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ CRM-МОДЕЛЮВАННЯ

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

Вивчено вплив вітроенергетичних установок на орнітофауну, зокрема ризику зіткнення птахів із лопатями ротора. Особливої актуальності ця проблема набуває в гірських екосистемах, де орографічні особливості, висхідні повітряні потоки та просторово-часова структура міграцій визначають характер використання повітряного простору птахами.

Метою дослідження було визначення потенційного рівня колізійного ризику для хижих птахів у зоні розміщення проєктованої вітроенергетичної установки. Розрахунки виконано із застосуванням Collision Risk Model (CRM) для двох режимів польотної активності «normal approach» та «birds on migration» із використанням чотирьох сценаріїв поведінкового уникнення: 95, 98, 99 та 99,5 %.

За сценарієм «normal approach» найбільший потенційний ризик встановлено для канюка звичайного (*Buteo buteo* Linnaeus, 1758): за прогнозованої кількості 195 перетинів площини ротора на рік базова частота потенційних зіткнень становила 10 випадків на рік. Врахування поведінкового уникнення зменшувало цей показник до 0,5 випадку за коефіцієнта 95 %, 0,2 – за 98 % та 0,1 – за 99 і 99,5 %. За сценарієм «birds on migration» найбільшу кількість прогнозованих перетинів площини ротора отримано для канюка звичайного 55 ос./рік, луня очеретяного (*Circus aeruginosus* Linnaeus, 1758) – 30 ос./рік, яструба малого (Accipiter nisus Linnaeus, 1758) – 23 ос./рік та боривітра звичайного (*Falco tinnunculus* Linnaeus, 1758) – 14 ос./рік. Після врахування поведінкового уникнення прогнозована частота зіткнень для більшості видів не перевищувала 0,2 випадку на рік.

Результати свідчать про прогнозований рівень прямого колізійного ризику за прийнятих параметрів моделі. Водночас встановлено залежність результатів CRM від просторово-часової структури польотів та коефіцієнта уникнення. Для гірських екосистем обґрунтовано доцільність доповнення CRM просторовими, орографічними, метеорологічними та поведінковими параметрами з подальшою інтеграцією результатів у багаторівневу просторово-часову модель колізійного ризику. *Ключові слова:* вітроенергетика, вітроенергетична установка, хижі птахи, колізійний ризик, Collision Risk Model, поведінкове уникнення, міграція, гірські екосистеми, просторово-часове моделювання.

Spatiotemporal Differentiation Of Bird Collision Risk With Wind Turbines Using Collision Risk Modeling. Kovhan Ya., Herasymenko M.

The development of wind energy requires quantitative assessment of the potential effects of wind turbines on avifauna, particularly the risk of bird collisions with rotor blades. This issue is especially relevant in mountain ecosystems, where topographic features, updrafts, and the spatiotemporal structure of migration determine how birds use the aerial environment.

The aim of this study was to determine the potential collision risk for raptors in the area of a proposed wind turbine. Calculations were performed using the Collision Risk Model (CRM) for two flight-activity scenarios, “normal approach” and “birds on migration”, with four avoidance-rate scenarios: 95, 98, 99, and 99.5%.

Under the “normal approach” scenario, the highest potential risk was estimated for the Common Buzzard (Buteo buteo): with a predicted 195 rotor-plane crossings per year, the baseline collision frequency was 10 collisions per year. Accounting for behavioural avoidance reduced this value to 0.5 collisions at a 95% avoidance rate, 0.2 at 98%, and 0.1 at both 99 and 99.5%. Under the “birds on migration” scenario, the highest numbers of predicted rotor-plane crossings were obtained for the Common Buzzard (55 individuals/year), Western Marsh Harrier (*Circus aeruginosus*) (30), Eurasian Sparrowhawk (*Accipiter nisus*) (23), and Common Kestrel (*Falco tinnunculus*) (14). After accounting for behavioural avoidance, the predicted collision frequency did not exceed 0.2 collisions per year for most species.

The results indicate a low predicted level of direct collision risk under the adopted model parameters. At the same time, CRM results were found to depend on the spatiotemporal structure of flight activity and the assumed avoidance rate. For mountain ecosystems, the results support the integration of CRM with spatial, topographic, meteorological, and behavioural parameters, followed by incorporation of CRM outputs into a multilevel spatiotemporal collision-risk model. *Key words:* wind energy, wind turbine, raptors, collision risk, Collision Risk Model, behavioural avoidance, migration, mountain ecosystems, spatiotemporal modelling.

© Ковган Я.О., Герасименко М.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Вступ. Розширення використання відновлюваних джерел енергії є одним із важливих напрямів трансформації енергетичних систем. Водночас розвиток вітроенергетики потребує врахування потенційного впливу вітроенергетичних установок (ВЕУ) на біорізноманіття. Одним із ключових механізмів такого впливу є зіткнення птахів із конструктивними елементами турбін, насамперед із лопатями ротора. Ризик зіткнення формується внаслідок взаємодії видових, просторових, метеорологічних та технічних чинників і не може бути адекватно охарактеризований лише чисельністю птахів на території [1, 2].

До основних факторів, пов'язаних із колізійним ризиком, належать чисельність та поведінка птахів, морфологічні характеристики виду, висота і траєкторія польоту, особливості використання території, характеристики ландшафту, метеорологічні умови, а також конструктивні параметри та просторове розташування ВЕУ [2]. Таким чином, високий ризик зіткнення формується не одним фактором, а їх поєднанням.

Особливого значення ці закономірності набувають у гірських екосистемах. Рельєф визначає структуру повітряних потоків і може створювати умови для використання птахами орографічного підйому та ширяння. Просторові характеристики ландшафту пов'язані з розподілом зон, сприятливих для висхідного руху повітря, що, своєю чергою, може впливати на траєкторії переміщення ширяючих птахів [3]. Атмосферні умови також здатні змінювати напрямок, швидкість і просторову структуру міграційних переміщень [4]. Тому в гірських районах навіть відносно невелика територія може характеризуватися значною просторовою неоднорідністю польотної активності та, відповідно, колізійного ризику.

Одним із найбільш поширених інструментів кількісного прогнозування потенційних зіткнень є Collision Risk Model (CRM), методологічна основа якого була сформована в роботах Band та співавторів [5, 6]. CRM передбачає послідовний розрахунок кількості пташиних польотів через площу ротора, геометричної ймовірності зіткнення та очікуваної кількості зіткнень із подальшим урахуванням поведінкового уникнення. Сучасна методика NatureScot розглядає CRM як стандартизований інструмент кількісного прогнозування колізійного ризику для наземних вітрових електростанцій [7, 8].

Водночас CRM не є універсальним показником фактичної смертності. Результат моделі залежить від якості польових спостережень, характеристики польотної активності та висоти польоту, параметрів ВЕУ, припущень щодо поведінки птахів і прийнятого коефіцієнта уникнення. Огляд Masden і Cook [9] показав, що CRM є інформативним інструментом, але характеризується значною залежністю від вихідних даних та модельних припущень. У сучасній методиці також наголошується на необхідності врахування невизначеності параметрів моделі та відповідності обраних коефіцієнтів уникнення конкретним умовам і видам [8].

Отже, актуальним є не лише визначення абсолютної прогнозованої кількості зіткнень, а й аналіз її просторово-часової та видової структури, а також чутливості результатів до зміни параметрів поведінкового уникнення.

Метою дослідження було проаналізувати результати CRM-моделювання потенційного ризику зіткнень птахів із ВЕУ за різних режимів польотної активності та сценаріїв поведінкового уникнення, а також визначити чинники, що обумовлюють просторово-часову диференціацію ризику в умовах гірської екосистеми.

Матеріали та методи. Вихідною інформацією для моделювання були результати польових орнітологічних досліджень, проведених на території проєктованого розміщення вітрової електростанції. Для розрахунків використано дані щодо видового складу, чисельності, висоти та просторової активності птахів. До аналізу включено види, польоти яких реєструвалися в межах висотного діапазону, відповідного робочій зоні ротора ВЕУ, – 34-216 м.

У моделюванні враховували чисельність птахів, частоту та інтенсивність польотів, висоту польоту, частку польотів у межах робочого діапазону ротора, прогнозовану кількість перетинів площини ротора, конструктивні параметри ВЕУ та поведінкове уникнення.

CRM концептуально передбачає послідовний перехід від кількості польотів через площу ротора до ймовірності зіткнення одного птаха під час перетину площі ротора і, відповідно, до очікуваної кількості зіткнень за певний період [6, 7]. Важливою складовою моделі є врахування поведінкового уникнення, оскільки птахи можуть змінювати напрямок або висоту польоту при наближенні до ВЕУ [8].

Для інтерпретації результатів розрізняли:

– базову частоту потенційних зіткнень – розрахунок до врахування поведінкового уникнення;

– прогнозовану частоту зіткнень – результат після застосування відповідного коефіцієнта уникнення.

Такий підхід відповідає структурі CRM, у якій розрахунок ймовірності зіткнення передує коригуванню результату на поведінкове уникнення [6-8].

Для аналізу чутливості результатів використано чотири сценарії поведінкового уникнення: 95, 98, 99 та 99,5 %. Ці значення використано саме як сценарний діапазон для перевірки чутливості моделі, а не як універсальні видові коефіцієнти. Така постановка є принципово важливою, оскільки сучасні рекомендації підкреслюють необхідність обґрунтованого вибору avoidance rate з урахуванням виду та умов дослідження [8].

Аналіз проведено окремо для двох режимів польотної активності:

«normal approach» – звичайної локальної польотної активності;

«birds on migration» – транзитних міграційних переміщень.

Результати дослідження. *Результати CRM за сценарієм «normal approach»*. За умов звичайної локальної польотної активності найбільшу кількість потенційних перетинів площини ротора встановлено для канюка звичайного (*Buteo buteo* Linnaeus, 1758) – 195 ос./рік. Для цього виду базова частота потенційних зіткнень без урахування поведінкового уникнення становила 10 випадків на рік.

Для інших видів показники були істотно нижчими. Яструб малий (*Accipiter nisus* Linnaeus, 1758) мав два прогнозованих перетини площини ротора на рік, осоїд (*Pernis apivorus* Linnaeus, 1758) – один, лунь очеретяний (*Circus aeruginosus* Linnaeus, 1758) – чотири, лунь лучний (*Circus pygargus* Linnaeus, 1758) – один, підсоколик великий (*Falco subbuteo* Linnaeus, 1758) – один, боривітер звичайний (*Falco tinnunculus* Linnaeus, 1758) – п'ять. Для яструба великого (*Accipiter gentilis* Linnaeus, 1758), зимняка (*Buteo lagopus* Pontoppidan, 1763), луня польового (*Circus cyaneus* Linnaeus, 1766), луня степового (*Circus macrourus* S. G. Gmelin, 1771) та змієїда (*Circaetus gallicus* Gmelin, 1788) потенційні перетини не були зафіксовані. Після врахування поведінкового уникнення прогнозована частота зіткнень для канюка звичайного становила:

Коефіцієнт уникнення	Очікувана кількість зіткнень, ос./рік
95 %	0,5
98 %	0,2
99 %	0,1
99,5 %	0,1

Таким чином, застосування поведінкового коефіцієнта призвело до істотного зменшення прогнозованої частоти зіткнень. Для інших досліджених видів прогнозовані значення за всіма сценаріями були нульовими або наближалися до нульового рівня.

Канюк звичайний формував основну частину розрахункового ризику за сценарію «normal approach». Така закономірність може бути пов'язана з особливостями просторового використання території та характером польотної активності виду. Відомо, що характеристики виду, ландшафту та вітрової електростанції взаємодіють у формуванні ризику зіткнень [2]. Для ширяючих птахів важливе значення також мають доступність висхідних потоків і просторове розташування орографічних структур [3].

Результати CRM за сценарієм «birds on migration». За міграційного сценарію структура потенційного ризику була дещо іншою. Найбільшу кількість прогнозованих перетинів площини ротора отримано для канюка звичайного – 55 ос./рік, луня очеретяного – 30, яструба малого – 23, боривітра звичайного – 14, осоїда – 10 та луня лучного – 10 ос./рік.

Без урахування поведінкового уникнення максимальна частота потенційних зіткнень становила 3 випадки на рік для канюка звичайного, 2 – для луня очеретяного та по 1 випадку – для яструба малого і боривітра звичайного.

Після врахування поведінкового уникнення для канюка звичайного прогнозована кількість зіткнень становила 0,2 випадку на рік за 95 % уникнення та 0,1 випадку за 98 %. За сценаріїв 99 і 99,5 % результат округлювався до нуля. Для луня очеретяного та яструба малого за 95 % уникнення прогнозована частота становила близько 0,1 випадку на рік, тоді як за вищих коефіцієнтів уникнення наближалася до нуля.

Отже, збільшення кількості транзитних перетинів площини ротора в міграційний період не супроводжувалося пропорційним збільшенням прогнозованої кількості зіткнень після врахування поведінкового уникнення.

Обговорення. Отримані результати демонструють виражену видову неоднорідність потенційного колізійного ризику. Основна частина прогнозованого ризику припадала на канюка звичайного. Це узгоджується із загальним положенням про те, що ризик зіткнення формується комплексом видових, просторових та технічних факторів, а не визначається лише чисельністю птахів [2].

Для гірських територій особливого значення набуває просторове розташування зон висхідних потоків. Дослідження Scacco et al. [3] показало, що статичні ландшафтні характеристики можуть бути предикторами розташування зон підйому, які використовуються ширяючими птахами. Атмосферні умови, своєю чергою, можуть істотно змінювати траєкторії та просторову організацію міграційних переміщень [4]. Тому однакова середня інтенсивність польотів може відповідати різним просторовим конфігураціям ризику.

Одним із найбільш важливих результатів моделювання є суттєве зниження прогнозованої кількості зіткнень після введення коефіцієнта уникнення. Для канюка звичайного за локального сценарію перехід від 10 потенційних зіткнень до 0,5 за 95 % уникнення означає приблизно 20-кратне зменшення прогнозованого показника. За 98 % уникнення він зменшується приблизно у 50 разів, до 0,2 випадку на рік.

Цей результат демонструє високу чутливість CRM до параметра поведінкового уникнення. Саме тому avoidance rate не слід розглядати як другорядний технічний коефіцієнт. У сучасному CRM він є одним із ключових параметрів, що переводить теоретичну ймовірність зіткнення у прогнозовану кількість зіткнень [8].

Водночас застосування одного фіксованого коефіцієнта для різних видів може спрощувати реальну поведінкову реакцію. У сучасних рекомендаціях NatureScot підкреслюється необхідність обґрунту-

вання avoidance rate та його відповідності конкретному виду й умовам оцінювання [8]. Тому використання у цьому дослідженні чотирьох сценаріїв доцільно розглядати передусім як аналіз чутливості результату до поведінкового параметра.

Порівняння «normal approach» та «birds on migration» показало зміну структури ризику в міграційний період. Збільшення кількості видів і особин, які потенційно перетинають площину ротора, відображає підвищення інтенсивності транзитних переміщень. Однак після врахування поведінкового уникнення прогнозована кількість зіткнень залишалася низькою. Це підтверджує, що інтенсивність польотного потоку і колізійний ризик є взаємопов'язаними, але не тотожними характеристиками.

Разом із тим отримані результати не слід інтерпретувати як доказ відсутності екологічно значущого впливу ВЕУ. CRM прогнозує насамперед ризик прямого зіткнення, тоді як функціонування вітрових електростанцій може також спричиняти уникнення території, бар'єрний ефект, зміни використання середовища та інші поведінкові реакції [2, 7].

Крім того, прогнозована кількість зіткнень не є автоматично еквівалентною популяційно значущій смертності. Сучасні методичні рекомендації наголошують, що кількісний прогноз CRM має бути співвіднесений із відповідними популяціями та значущістю потенційного впливу [7, 8]. Тому твердження про відсутність впливу на локальні популяції потребувало б додаткового демографічного аналізу.

Ще одним обмеженням є залежність CRM від якості польових даних. Masden і Cook [9] показали, що сучасні CRM можуть бути «data hungry» та містити суттєві припущення щодо руху і поведінки птахів. У методиці Band [6, 7] окремо враховуються польотна активність, висота польоту, характеристики турбін, час роботи ВЕУ та avoidance rate. Отже, репрезентативність польових спостережень є критично важливою для достовірності прогнозу.

Для гірських екосистем ця проблема посилюється просторовою неоднорідністю повітряного простору. Усереднені показники польотної активності можуть приховувати локальні зони концентрації птахів поблизу вододілів, схилів, перевалів або інших орографічних структур.

У зв'язку з цим результати дослідження обґрунтовують необхідність переходу від простого просторово усередненого CRM до просторово-часової диференціації колізійного ризику. До інтегрованої моделі доцільно включати щонайменше п'ять груп змінних:

– орнітологічні – чисельність, видовий склад, частота та висота польотів;

– просторові – рельєф, відстань до ВЕУ, положення вододілів, схилів та міграційних коридорів;

– метеорологічні – швидкість і напрямок вітру, температура, атмосферні умови та характеристики висхідних потоків;

– технічні – висота маточини, діаметр ротора, робочий діапазон висот і просторове розташування турбін;

– часові – сезон, період доби та фаза міграції.

Таким чином, CRM у запропонованому підході розглядається як базовий кількісний компонент, а не як кінцева характеристика загального екологічного ризику. Концептуально інтеграцію можна представити як: польові орнітологічні дані → параметризація CRM → базовий колізійний ризик → просторово-часова диференціація → урахування орографічних, метеорологічних і поведінкових чинників → інтегральна характеристика ризику.

Такий підхід відповідає сучасному напрямові розвитку CRM, спрямованому на підвищення прозорості розрахунків, врахування невизначеності та кращу просторову репрезентативність прогнозів [7-9].

Висновки. CRM-моделювання показало низький прогнозований рівень прямого колізійного ризику для більшості досліджених видів хижих птахів. За сценарію «normal approach» найбільший внесок у ризик мав канюк звичайний (*Buteo buteo*): за 195 потенційних перетинів площини ротора на рік базова частота зіткнень становила 10 випадків, а після врахування поведінкового уникнення знижувалася до 0,5-0,1 випадку на рік.

За сценарію «birds on migration» найбільшу кількість потенційних перетинів встановлено для канюка звичайного, луня очеретяного, яструба малого та боривітра звичайного. Після врахування поведінкового уникнення прогнозована частота зіткнень для більшості видів наближалася до нульового рівня.

Встановлено високу чутливість результатів CRM до коефіцієнта поведінкового уникнення, що обґрунтовує використання сценарного підходу замість інтерпретації одного фіксованого значення.

Для гірських екосистем колізійний ризик має просторово-часову неоднорідність і формується взаємодією рельєфу, орографічних повітряних потоків, міграційних переміщень, висоти польоту та поведінкових реакцій птахів.

Класичний CRM є ефективним інструментом прогнозування прямого колізійного ризику, однак його результати не охоплюють усі компоненти екологічного впливу ВЕУ. Перспективним напрямом є інтеграція CRM із GIS-, дистанційними, метеорологічними та поведінковими даними у багаторівневу просторово-часову модель із подальшою емпіричною перевіркою прогнозів за результатами операційного моніторингу.

Під час підготовки рукопису використано інструменти генеративного штучного інтелекту для мовного редагування, удосконалення структури тексту та формулювання окремих положень. Наукова інтерпретація результатів, перевірка фактичних даних, вибір методів дослідження, розрахунки та відповідальність за зміст статті належать авторам.

Література

1. Band W. Windfarms and birds: calculating a theoretical collision risk assuming no avoiding action. Scottish Natural Heritage Guidance Note. Battleby : Scottish Natural Heritage, 2000. 10 p.
2. Band W., Madders M., Whitfield D. P. Developing field and analytical methods to assess avian collision risk at wind farms. Birds and Wind Power: Risk Assessment and Mitigation / eds. M. de Lucas, G. F. E. Janss, M. Ferrer. Madrid : Quercus, 2007. P. 259–275.
3. Band W. Using a collision risk model to assess bird collision risks for onshore wind farms. NatureScot Research Report 909. Edinburgh : NatureScot, 2024.
4. Masden E. A., Cook A. S. C. P. Avian collision risk models for wind energy impact assessments. Environmental Impact Assessment Review. 2016. Vol. 56. P. 43-49. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.09.001.
5. Marques A., Batalha H., Rodrigues S. et al. Understanding bird collisions at wind farms: an updated review on the causes and possible mitigation strategies. Biological Conservation. 2014. Vol. 179. P. 40-52. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.08.017.
6. Drewitt A. L., Langston R. H. W. Assessing the impacts of wind farms on birds. Ibis. 2006. Vol. 148, Suppl. 1. P. 29-42. DOI: 10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x.
7. Barrios L., Rodríguez A. Behavioural and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines. Journal of Applied Ecology. 2004. Vol. 41, No. 1. P. 72–81. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2004.00876.x.
8. Thaxter C. B., Buchanan G. M., Carr J. et al. Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2017. Vol. 284, No. 1862. Art. 20170829. DOI: 10.1098/rspb.2017.0829.
9. Shamoun-Baranes J., Liechti F., Vansteelant W. M. G. Atmospheric conditions create freeways, detours and tailbacks for migrating birds. Journal of Comparative Physiology A. 2017. Vol. 203. P. 509–529. DOI: 10.1007/s00359-017-1181-9.
10. Scacco M., Flack A., Duriez O., Wikelski M., Safi K. Static landscape features predict uplift locations for soaring birds across Europe. Royal Society Open Science. 2019. Vol. 6, No. 1. Art. 181440. DOI: 10.1098/rsos.181440.
11. NatureScot. Wind farm impacts on birds: use of avoidance rates in the NatureScot Wind Farm Collision Risk Model. Updated September 2025. Edinburgh : NatureScot, 2025.

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026