RUSSIAN JOURNAL OF ECOSYSTEM ECOLOGY Vol. 9 (4), 2024

Received 15.08.24 Revised 10.09.24 Accepted 05.12.24 RESEARCH ARTICLE Open Access

УДК 591.5 598.279.23 DOI 10.21685/2500-0578-2024-4-3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ВЫЖИВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИСТАНЦИИ ВСПУГИВАНИЯ У ПТИЦ

М. С. Романов[1], В. Б. Мастеров[2]

[1] *Институт математических проблем биологии Российской академии наук – филиал Института прикладной математики имени М. В. Келдыша Российской академии наук*
[2] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия*
[1] *romanov.eagle@gmail.com,* [2] *haliaeetus@yandex.ru*

Аннотация. Одним из основных способов охраны редких и уязвимых видов птиц является организация в местах их обитания буферных зон, чьи размеры определяются поведенческими особенностями вида, такими как реакция избегания. Количественная оценка этой реакции производится экспериментальным путем, через оценку дистанции вспугивания. Такой подход, подразумевающий обязательное вспугивание птиц, сам по себе оказывает негативное влияние на популяцию, подлежащую охране. Применяемый нами метод не требует обязательного вспугивания птиц; вместо этого регистрируется минимальное расстояние до птицы и ее реакция (слетела или нет). При такой постановке эксперимента возникает большое количество цензурированных данных, для анализа которых задействовали методы из области анализа выживаемости (метод Каплана – Мейера). Это позволило оценить дистанцию вспугивания белоплечих орланов (*Haliaeetus pelagicus*) на северо-востоке Сахалина и в Нижнем Приамурье, определить рекомендуемые радиусы буферных зон вокруг местообитаний птиц и выявить факторы, влияющие на реакцию птиц. Анализ показал, что пешего наблюдателя птицы боятся больше, чем техники; большие группы птиц более осторожны, чем малые группы и одиночные особи; в весеннее время орланы более уязвимы, чем в летнее. В весенний период рекомендуется организация 500-метровых буферных зон вокруг важных мест гнездования и массового скопления птиц. В летнее время достаточно буферной зоны радиусом 300 м. Наш опыт подтвердил, что данный подход можно рекомендовать к использованию при анализе реакции птиц на беспокойство. Предложенный нами метод является более щадящим, так как не требует обязательного вспугивания. Благодаря этому, метод можно применять параллельно другим видам работ в местах нахождения птиц, не оказывая дополнительного беспокоящего воздействия на них.

Ключевые слова: дистанция вспугивания, анализ выживания, белоплечий орлан, *Haliaeetus pelagicus*, Сахалин, цензурированные данные

Для цитирования: Романов М. С., Мастеров В. Б. Применение методов анализа выживания для оценки дистанции вспугивания у птиц // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2024. Vol. 9 (4). https://doi.org/10.21685/2500-0578-2024-4-3

APPLICATION OF SURVIVAL ANALYSIS METHODS FOR ASSESSING FLIGHT INITIATION DISTANCE IN BIRDS

M.S. Romanov[1], V.B. Masterov[2]

[1] *Institute of Mathematical Problems of Biology – branch of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*
[2] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[1] *romanov.eagle@gmail.com,* [2] *haliaeetus@yandex.ru*

Abstract. One of the main ways to protect rare and vulnerable bird species in their habitats is to establish buffer zones, the size of which is determined by the behavioural characteristics of the species, such as the avoidance response. This response is quantified experimentally, by estimating the flight initiation distance. This approach, which involves obligatory startling of birds, in itself has a negative impact on the population to be protected. The method we used does not require the obligatory startling of birds, but instead records the minimum distance to the bird and its response (whether it was flushed or not). This experimental design generates a large amount of censored data, which were analysed using survival analysis methods (Kaplan-Meier estimator). This allowed us to estimate the flight initiation distance for Steller's sea-eagles (*Haliaeetus pelagicus*) in Northeast Sakhalin and in the Lower Amur region, to determine the recommended radii of buffer zones around bird habitats and to identify fac-

© Романов М. С., Мастеров В. Б., 2024. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International License* (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

tors influencing the birds' response. The analysis showed that birds are more afraid of human observers than of vehicles; large groups of birds are more cautious than small groups and individuals; eagles are more vulnerable in spring than in summer. In spring, it is recommended that a 500 metre buffer zone be established around important nesting sites and mass gatherings of birds. In summer, a buffer zone of 300 metres is sufficient. Our experience confirms that this method can be recommended for use in analysing bird responses to disturbance. The method we used is less stressful, as it does not require mandatory startle. As a result, this approach can be used in parallel with other types of work in areas where birds are present, without causing additional disturbance to them.

Keywords: flight initiation distance, survival analysis, Steller's sea eagle, *Haliaeetus pelagicus*, Sakhalin Island, censored data

For citation: Romanov M.S., Masterov V.B. Application of survival analysis methods for assessing flight initiation distance in birds. Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2024;9(4). (In Russ.). Available from: https://doi.org/10.21685/2500-0578-2024-4-3

Введение

Анализ реакции птиц на беспокойство является важной частью мониторинга окружающей среды, необходимой для принятия природоохранных решений, например для определения размеров буферных зон для защиты популяции. К настоящему моменту собрана информация по многим видам и пришло время обобщений [1]. Создаются базы данных [2], анализируется полнота информации, принимаются усилия по заполнению пробелов в знаниях о данном [3]. При этом возникает проблема, заключающаяся в том, что многие из видов, по которым имеется меньше всего информации, имеют высокую чувствительность к беспокойству; к подобным видам относится и большинство крупных хищных птиц, таких как орлан-белохвост, беркут, скопа и др.

Традиционная методика изучения реакции на беспокойство основана на экспериментальном подходе. В упрощенном виде она выглядит так: наблюдатели приближаются к одной или нескольким птицам до тех пор, пока у тех не проявляется реакция избегания (т.е. пока птицы не улетают). При этом записываются различные условия эксперимента: помимо стандартного набора условий (дата, время, географические координаты, вид птицы) фиксируют тип источника беспокойства, число наблюдателей, скорость и траектория движения наблюдателей, число птиц в группе, их пол и возраст, свойства местообитания и многое другое. Целью эксперимента является определение расстояния, на котором птицы реагируют на наблюдателя. Оно называется дистанцией вспугивания (flight initiation distance) [4]. Последующий статистический анализ позволяет выявить факторы, влияющие на дистанцию вспугивания, а также определить безопасное расстояние, на котором бóльшая часть птиц не реагирует на источник беспокойства. Эти расстояния затем используются для расчета радиуса буферных зон в местах пребывания данного охраняемого вида птиц (Goodship, Furness, 2022).

Данный метод широко применяется и является стандартным подходом в подобных исследованиях (см., напр., [5]). Однако у него есть существенные недостатки. Первым их них является необходимость непременно добиться от животных поведенческой реакции (вспугивания), т.е. сама по себе методика вызывает у птиц стресс и оказывает негативное воздействие на популяцию, которую предполагается защитить. Второй недостаток связан с тем, что даже в идеальных условиях реакцию вспугивания не всегда удается получить. Например, наблюдатель по той или иной причине не имеет возможности приблизиться к птицам вплотную: например, из-за препятствия, или из-за того, что птицы сидят на воде или высоко на дереве. Подобные данные называются *цензурированными* (censored data). Значительное их количество в выборке приводит к так называемому «распределению с завышенным числом нулей» (в оригинале zero-inflated distribution [6, 7]), что значительно усложняет статистический анализ. Отбрасывание подобных данных также может приводить к систематической ошибке в получаемых оценках [8]. Поэтому мы убеждены, что цензурированные данные можно и нужно использовать, тем более что они сами по себе несут ценную информацию (о том, что птица не слетела на определенной дистанции от наблюдателя).

Между тем, в соседних областях науки (демографические, инженерные науки, медицина) уже давно разработана и с успехом применяется система методов, полноценно задействующая работу с цензурированными данными, а именно – анализ выживаемости (survival analysis) [9]. В этом разделе математической статистики моделируется динамика группы объектов (здоровых испытуемых, пациентов, технических устройств) до момента наступления некоего события (выздоровление, смерть,

поломка и т.п.). Если событие в наблюдаемый период времени не наступило, данные называются цензурированными. Цензурирование может быть как правым, так и левым: правое цензурирование возникает, когда объект выбыл из исследования (либо исследование было завершено), но событие так и не наступило. Левое цензурирование возникает, если событие наступило до начала эксперимента [10].

Нам известен пример применения анализа выживаемости для оценки дистанции вспугивания: это работа канадских исследователей [11], которые проводили мониторинг гнездящейся популяции королевского канюка (*Buteo regalis*) и попутно регистрировали реакцию птиц на приближение людей или техники. Наблюдатели приближались к гнездам на расстояние не ближе, чем требовалось для надежной оценки эффективности размножения птиц; если можно было посчитать птенцов с дистанции (глядя в бинокль или подзорную трубу), они это делали. В результате им, с одной стороны, удалось избежать лишнего беспокойства птиц, с другой – их выборки содержали значительное количество цензурированных данных. Для обработки данных авторы применили регрессионную модель пропорциональных рисков Кокса (Cox proportional hazards model) для количественной оценки дистанции вспугивания и оценки факторов, влияющих на нее. Несмотря на очевидные преимущества такого подхода, он, по-видимому, остается мало замеченным в научном сообществе и пока не получил большого распространения.

Наши мониторинговые исследования состояния популяции белоплечего орлана (*Haliaeetus pelagicus*) на о. Сахалин и в Нижнем Приамурье в 2004–2021 гг. [12] были организованы по схеме, имеющей ряд общих черт с работой канадских авторов [11]. Наши полевые работы также включали оценку продуктивности орланов, и мы также регистрировали наличие или отсутствие реакции избегания. Однако, кроме этого, мы вели учет встреченных особей орланов и регистрировали их реакцию на наблюдателя. При этом мы так же, как и канадские орнитологи, старались избегать лишнего беспокойства птиц и многие из встреченных орланов остались не вспугнутыми. В результате, как и Nordell с соавторами, у нас образовался массив данных о дистанциях вспугивания со значительной долей цензурирования. Поэтому естественным решением было применить к анализу этих данных модели выживания.

Помимо основной цели нашего исследования – оценки дистанции вспугивания и выявление влияющих на нее факторов, мы также ставили перед собой задачу популяризации данного подхода в русскоязычном научном сообществе как более щадящего по сравнению с традиционными методиками. Поэтому дополнительное внимание мы уделили описанию технических моментов, таких как подготовка и обработка данных, с тем чтобы любой исследователь мог воспользоваться данной методикой и воспроизвести ее на своем массиве данных.

Район и объект исследования

Объектом исследования является белоплечий орлан *Haliaeetus pelagicus* (Pallas, 1811) (далее белоплечий орлан) – уязвимый вид хищных птиц, чья мировая популяция не превышает 6–7 тыс. особей (Masterov et al., 2018). Из-за ограниченного ареала гнездования (Дальний Восток России) и низкой продуктивности вид занесен в Красный список МСОП как глобально угрожаемый (уязвимый) таксон [13] и целый ряд других природоохранных документов.

Две крупные популяции этого вида сосредоточены на о. Сахалин, преимущественно в северо-восточной его части, а также в нижнем Приамурье [14]. Начиная с 2004 г. на Сахалине и с 2006 г. в Приамурье был организован многолетний мониторинг состояния популяции белоплечего орлана под руководством В. Мастерова, в ходе которого был собран большой объем данных по экологии и демографии этого вида.

Полевые методы

Основные полевые работы проводили в летнее время: в июле – августе. В некоторые годы проводили дополнительные весенние экспедиции (в апреле) на Сахалин, где оценивали занятость гнездовых участков. В ходе этих работ попутно регистрировали встречи с орланами, по возможности оценивая различные характеристики птиц, включая и их реакцию на наблюдателей.

При встречах хищных птиц (преимущественно это были белоплечие орланы, но также орланы-белохвосты) по возможности регистрировали условия наблюдения и характеристики самих птиц: дата, время и место наблюдения, вид птиц, число особей, их возраст (молодые или взрослые), тип источника беспокойства (пешеход, моторная лодка, автомобиль, снегоход). Отдельно регистрировалось наличие реакции избегания (слетели или нет). При этом мы не ставили перед собой задачи добиваться вспугивания, наоборот, старались не приближаться к птицам ближе, чем того требовали

остальные цели мониторинга (например, оценка продуктивности размножения). Вместо этого мы просто отмечали минимальную дистанцию, на которую удалось приблизиться, и реакцию птиц. Таким образом, получили массив данных со значительным количеством цензурированных данных, когда птица так и не была вспугнута. Кроме того, могут быть случаи, когда птица появилась перед наблюдателем, будучи уже вспугнутой.

Для измерения расстояния применяли разные способы:

1) прямое измерение с помощью лазерного дальномера, который наводился на присаду или какой-либо объект рядом с птицей;

2) измерение дистанции между двумя точками с известными координатами с помощью ГИС;

3) экспертная глазомерная оценка. Если птица сидела не на земле, а на присаде (гнездо, дерево, высокий обрыв), то в соответствии с рекомендацией [15] расстояние измеряли до самой птицы, а не до основания присады.

Описание базы данных

Общий объем базы данных. Для анализа выбрали 1176 случаев реакции орланов на беспокойство, из которых лишь в 639 (54 %) встреч был зарегистрирован момент события (птицы были вспугнуты на определенной дистанции). Еще в 533 (46 %) случаев событие не зарегистрировано, т.е. имеется цензурирование слева (поскольку предположительная дистанция вспугивания меньше, чем расстояние до птицы). Еще в четырех случаях возникло цензурирование справа, когда особь показалась перед наблюдателем (вылетела на него), будучи уже явно вспугнутой, т.е. истинная дистанция вспугивания больше, чем расстояние до птицы.

Распределение по видам. Абсолютное большинство записей (n = 1104) относится к белоплечему орлану. Имеются также регистрации орлана-белохвоста (n = 72). **Тип источника беспокойства.** Всего выделили четыре разных типа источников беспокойства, чей объем выборки превышал 10: пеший наблюдатель (n = 317), моторная лодка (n = 317), снегоход (n = 234) и автомобиль (n = 17). Еще для 289 встреч тип источника беспокойства не был указан. **Возраст птиц.** 1022 записи относятся к взрослым особям, 134 – к молодым (имматурным, возрастом от 1 года) и 13 записей – к слеткам, т.е. ювенильным особям, родившимся в текущем году. **Число птиц в группе.** Большинство встреч орланов было с одиночными особями (726 записей, из них 329 содержат цензурированные данные) или группами по две особи (323 встреч, включая 136 цензурированных). Группы по три и более особи были встречены 51 раз (из них 36 случаев цензурированные). **Время года.** 452 встречи были зарегистрированы весной, в апреле, 724 – летом, преимущественно в июле-августе. **Регион.** Основная часть наблюдений (980) сделана на о. Сахалин, в том числе 970 встреч на северо-восточном побережье и 10 встреч в устье р. Уанга в западной части острова. Имеются также данные о 196 встречах орланов на материке, в нижнем Приамурье.

Анализ данных

Все зарегистрированные встречи, когда удавалось измерить или иным способом оценить дистанцию до птицы, фиксировали с последующим занесением в базу данных. Подавляющее большинство записей относится к белоплечему орлану, однако в базе имеется некоторое количество записей об орлане-белохвосте. Кроме того, при анализе факторов, влияющих на реакцию птиц, мы исключали из выборки редкие значения фактора (для которых объем выборки меньше 10). Например, в базе зарегистрировано всего два случая беспокойства с использованием дрона (квадрокоптера DGI). Эти данные используются в общем анализе, но из анализа влияния типа источника воздействия они исключаются.

В качестве инструмента моделирования выбрали модель Каплана – Мейера [16], так как она не требует наличия какой-либо функции, описывающей форму кривой и, кроме того, является одной из наиболее широко распространенных моделей для анализа кривых дожития. Для сравнения также строили кривую уровня беспокойства традиционным способом, отбросив цензурированные данные. Значимость различий между медианными дистанциями вспугивания анализировали с помощью логрангового критерия (log rank test [17]). Нас также интересовали квантили 0,9 и 0,95, т.е. расстояние, на котором защищены 90 % и 95 % особей, которое можно интерпретировать как рекомендуемый радиус буферных зон. Эти статистики сравнивали пермутационным методом, с помощью двустороннего рандомизационного теста [18]. Для этого выборки A и B объединялись в общую выборку. Затем из объединенной выборки случайным образом формировались два подмножества того же размера, что и исходные выборки, строились кривые Каплана – Мейера, определялись квантили. Для каждой рандомизации повторно вычислялась статистика

$D = P^{A'}_{0,95} - P^{B'}_{0,95}$, где A' и B' – рандомизированные выборки. Процедура повторялась 10 000 раз, чтобы получить эмпирическое распределение при выполнении нулевой гипотезы (о том, что различия отсутствуют). Наблюдаемая разность квантилей сравнивалась с этим распределением, а p-значение оценивалось как доля рандомизаций, где абсолютное значение разности превышало наблюдаемое.

Для графической иллюстрации результатов мы выбрали кривые дожития Каплана – Мейера. Они начинаются с единицы и постепенно убывают, показывая, какой процент наблюдаемых объектов остается под наблюдением в течение времени. В нашем случае по оси X откладывается дистанция и кривые показывают, какой процент наблюдаемых особей подвержен беспокойству на каждой конкретной дистанции. Далее в тексте они упоминаются как «кривые уровня беспокойства». Для «традиционной» кривой 95-процентные доверительные «трубки» (95 %) построены пермутационным способом (число пермутаций $n = 10^4$).

Все расчеты делали в среде статистического программирования *R* [19]. Для моделирования дистанции вспугивания использовали пакет "survival", разработанный для анализа выживаемости [20].

Влияние цензурирования на результат обработки

По исходным данным были построены две кривые уровня беспокойства: первая, использующая традиционный подход, при котором из выборки исключаются цензурированные данные, и вторая, модельная, основанная на модели Каплана – Мейера и использующая цензурированные данные (рис. 1).

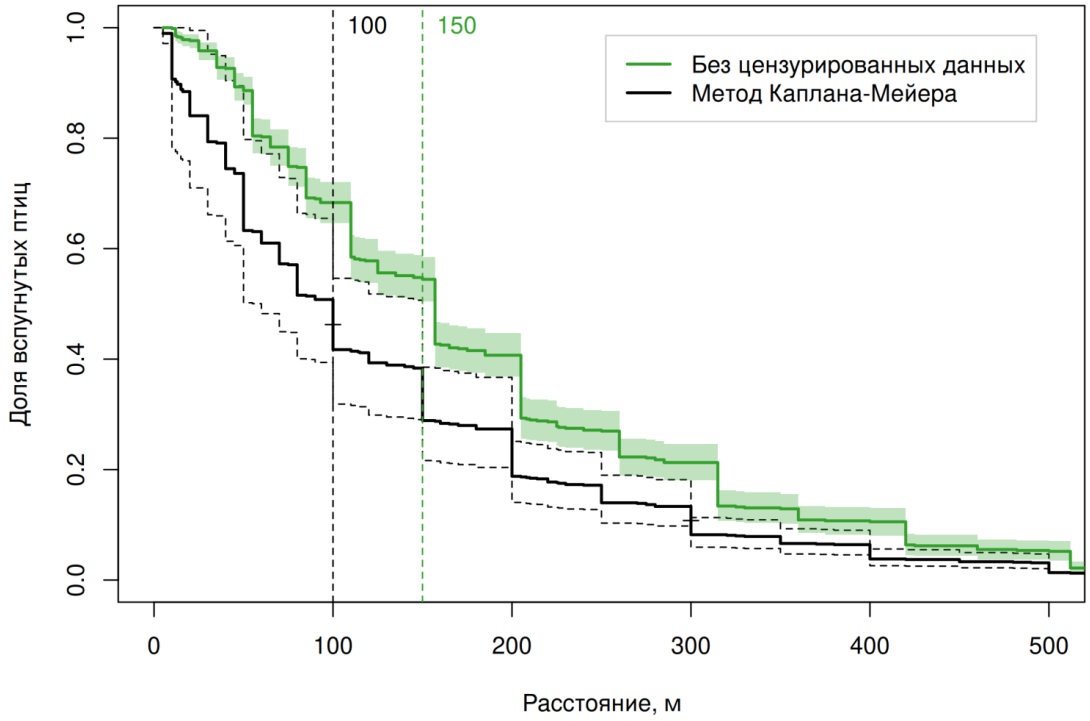

Рис. 1. Сравнение кривых уровня беспокойства, построенных вручную и с посредством моделирования (по методу Каплана – Мейера)

Fig. 1. Comparison between manual and modelled (with Kaplan – Meier method) disturbance curves

Уже из визуального анализа рисунка видно, что кривые сильно отличаются: они расположены далеко друг от друга, их доверительные интервалы практически не пересекаются, а медианные значения (50 % потревоженных особей) различаются в полтора раза. В модельной кривой медианная дистанция вспугивания оценивается в 100 м, в «традиционной» – в 150 м. Статистический анализ показал, что не только медианы, но и другие оценки, полученные разными способами, значимо различаются (табл. 1). Так, радиусы буферных зон, необходимые для защиты 50, 90, 95 % особей, рассчитанные без использования цензурированных данных оказались значимо выше, чем полученные с использованием всех данных ($p_{0,5} = 1 \cdot 10^{-4}$, $p_{0,9} = 0{,}001$, $p_{0,95} = 0{,}0134$, двусторонний рандомизационный тест). Таким образом, мы видим, что отбрасывание цензурированных данных привело к смещению оценок в более консервативную сторону.

Таблица 1

Оценки дистанции вспугивания и радиусов буферных зон, полученные с помощью разных методов

Table 1

Estimates of the flight initiation distance and buffer zone radii obtained using different methods

Метод	Описательная статистика дистанции вспугивания*			
	$M \pm SE$	$P_{0,5}$	$P_{0,9}$	$P_{0,95}$
Традиционный метод	178,6 ± 5,6	150 (150–150)	400 (350–400)	500 (400–500)
Метод Каплана – Мейера	132,6 ± 3,9	100 (60–145)	300 (280–350)	400 (350–450)

Обозначения: *$M \pm SE$ – среднее арифметическое и ошибка среднего; $P_{0,5}$ – медианная дистанция (соответствует радиусу буферной зоны для защиты 50 % особей; $P_{0,9}$, $P_{0,95}$ – квантили 0,9 и 0,95 (защищено 90 и 95 % особей).

Далее будем использовать только модельный подход и рассмотрим влияние различных факторов на уровень беспокойства.

Влияние различных факторов на дистанцию вспугивания

Видовая принадлежность. Визуально кривые уровня беспокойства для этих двух изученных видов не совпадают (рис. 2,*A*): на ближних дистанциях белоплечий орлан кажется несколько более толерантным к беспокойству, на дальних – более уязвимым. Статистический анализ не выявил значимых различий между медианными дистанциями и квантилями 0,9, но выявил различия между квантилями 0,95. Для белоплечего орлана эта дистанция, при которой не реагируют на наблюдателя 95 % особей, составляет 400 м, для орлана-белохвоста – 250 м. Дальнейший анализ дистанции вспугивания выполняли только для белоплечего орлана. Результаты этого анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценки дистанций вспугивания и радиусов буферных зон для разных видов: белоплечего орлана и орлана-белохвоста

Table 2

Estimates of the flight initiation distances and buffer zone radii for different species: the Steller's sea eagle and the White-tailed eagle

Фактор	$M \pm SE$	Protection buffer 50 %	Protection buffer 90 %	Protection buffer 95 %
Вид				
Белоплечий орлан	132,6 ± 3,9	100	300	400^{a}
Орлан-белохвост	107,1 ± 8,4	90	200	250^{b}
Тип источника беспокойства				
Автомобиль	60,0 ± 13,1	30^{abc}	150^{a}	150^{abc}
Моторная лодка	96,3 ± 4,4	70^{a}	200^{a}	250^{a}
Человек	130,9 ± 6,1	100^{b}	300^{b}	350^{b}
Снегоход	188,8 ± 10,5	150^{c}	400^{c}	500^{c}
Число особей в группе				
Одна	115,4 ± 4,0	100^{a}	250^{a}	350^{a}
Две	162,6 ± 7,7	130^{b}	350^{b}	450^{b}
Много	236,8 ± 10,4	200^{c}	400^{b}	500^{ab}
Сезон года				
Весна	161,6 ± 7,1	100^{a}	400^{a}	500^{a}
Лето	113,0 ± 3,8	80^{b}	250^{b}	300^{b}

Примечание: буквенные индексы обозначают наличие значимых различий данной характеристики (рандомизационный метод, $p < 0,05$). Разные буквы указывают на наличие различий, одинаковые буквы – на отсутствие различий.

Тип источника беспокойства. Согласно всем полученным результатам, тип источника беспокойства значимо влияет на уровень беспокойства ($p = 7 \cdot 10^{-13}$) (рис. 2,*B*). Для всех типов источников, за исключением автомобиля (для которого выборка была самая маленькая), дистанции значимо различаются. В целом, орланы наиболее терпимо относятся к автомобилю (для защиты 95 % популяции достаточно буферной зоны 150 м), за которым следует моторная лодка (радиус – 250 м), пешеход (радиус – 350 м) и снегоход (радиус – 500 м).

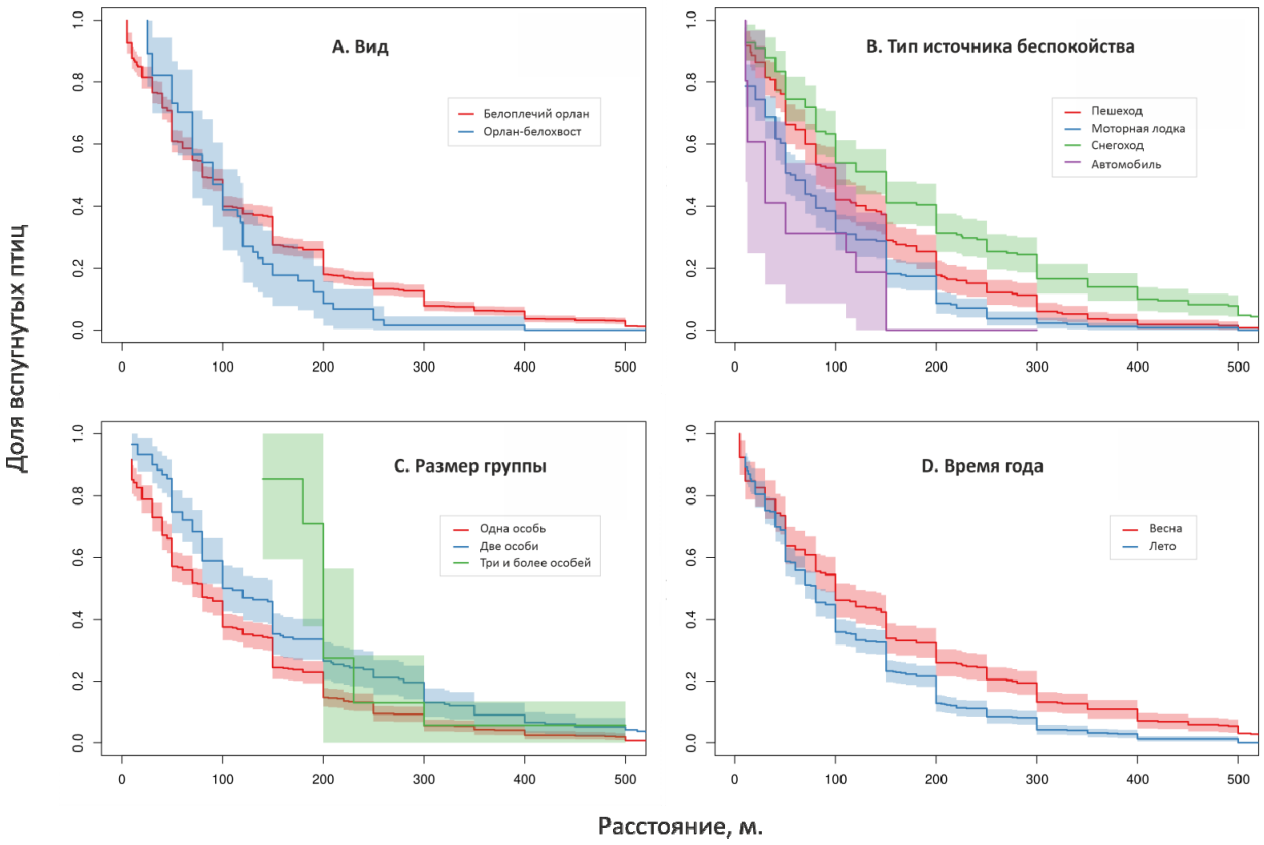

Рис. 2. Влияние различных факторов на уровень беспокойства орланов

Fig. 2. Influence of different factors on the level of eagle disturbance

Число птиц в группе. Анализ показал, что дистанция вспугивания положительно связана с размером группы. Медианная дистанция вспугивания для одной особи по разным оценкам составляет от 70 до 100 м, для двух особей – 100–130 м, для трех и более особей – 200 м. Рекомендуемые радиусы буферных зон также различаются: 350, 450, 400–500 м. Эти различия носят статистически достоверный характер (рис. 2,*C*).

Время года (весна, лето). 442 встреч весной (из них 213 цензурированных), 658 встреч летом (290 цензурированных). Различия в дистанциях вспугивания весной и летом оказались весьма значительны. Особенно хорошо они заметны на дальних дистанциях. Медианная дистанция вспугивания по разным оценкам весной оказалась равна 100–150 м, а летом – 80–90 м. Радиус рекомендуемых буферных зон – 500 и 300 м, соответственно (рис. 2,*D*).

Обсуждение

Анализ воздействия беспокойства на реакцию вспугивания орланов выявил, что на реакцию птиц могут влиять различные факторы, такие как тип источника беспокойства, число птиц в группе, время года и др. В целом, эти результаты подтвердили уже известные ранее закономерности. Например, еще раз подтвердился уже известный, но парадоксальный факт, что людей птицы боятся больше, чем техники (автомобиль, моторная лодка). Возможно, это происходит, потому что технику хищные птицы воспринимают как какого-то крупного зверя. Так или иначе, данный феномен хорошо известен в литературе [21, 22]. Исключение составил снегоход, для которого дистанция вспугивания оказалась очень большой, однако этот транспорт используется ранней весной, когда птицы более чувствительны к беспокойству (см. ниже). Далее, птицы в группе оказались

более осторожны, чем одиночные особи, причем группы по несколько особей более осторожны по сравнению с группами по две особи. Данный феномен отмечался в литературе [23]. Этот результат может объясняться чисто комбинаторными причинами. Дело в том, что поведение группы определяется реакцией наиболее осторожной особи, так что, чем больше группа, тем больше шансов, что в ее составе окажется хотя бы одна осторожная птица. Одной из причин, по которым эволюционно возникла сама способность птиц собираться в скопления, являлась необходимость защиты от хищников и врагов [24]. Данный фактор может иметь значение при организации буферных зон в различных частях мест гнездования. На гнездовых участках особи, как правило, находятся по одной или парами. Скопления особей обычно образуются в местах коллективных кормежек и ночевок молодых и взрослых нетерриториальных особей. Часто это бывают обширные отмели богатых рыбой водоемов, на которых во время отлива скапливается по несколько десятков птиц. Для таких мест требуется больший радиус буферных зон, чем для мест гнездования.

Наиболее сильное влияние на дистанцию вспугивания оказывает время года, точнее, стадия гнездового сезона. Наши результаты подтверждают, что весной, в начале гнездового сезона, птицы намного более осторожны, чем летом: для защиты 95 % особей нужны буферные зоны радиусом 500 и 300 м, соответственно. Из литературы известно, что в начале гнездового сезона связь родителей с территорией минимальная [14]. В этот период даже небольшое беспокойство способно помешать орланам загнездиться и даже может заставить бросить уже сделанную кладку. Известно также, что хищные птицы наиболее чувствительны к беспокойству во время строительства гнезда, откладывания яиц и инкубации; по мере роста и взросления птенцов их поведение становится более толерантным [25]. У белоплечего орлана период наибольшей уязвимости к беспокойству приходится на конец инкубации и первый месяц жизни птенцов, т.е. продолжается с середины мая по 20–25 июня [14, 26]. Помимо этих поведенческих особенностей на реакцию птиц, скорее всего, оказывают влияние защитные свойства растительности весной и летом. На Сахалине гнездовые местообитания орланов представлены в основном лиственничниками, и в апреле эти леса стоят практически голыми, а поверхность земли покрыта снегом. В результате контрастно окрашенных орланов хорошо видно за много сотен метров; орланам также хорошо видно приближение наблюдателей, в результате чего они ведут себя более беспокойно. Летом защитные свойства растительности возрастают и поведение орланов становится более спокойным. Влияние свойств ландшафта на реакцию избегания у орланов отмечал в свое время Stalmaster с соавторами [23].

Что касается межвидовых различий в реакции вспугивания, то однозначно и убедительно их выявить не удалось. Кривые уровня беспокойства в значительной мере перекрываются. Метод Каплана – Мейера не выявляет различий. Рандомизационный тест показал, что из трех сравниваемых стастистик только по одной ($P_{0,95}$) имеются различия на уровне $p < 0,05$, что при большом количестве тестов может являться результатом случайности (ошибка I рода). Наши личные наблюдения не позволяют сделать однозначный вывод о какой-либо разнице в реакции белоплечего орлана и орлана-белохвоста на беспокойство.

Кроме изученных нами факторов, на поведение птиц может влиять высота присады (орланы, сидящие на земле, более чувствительны к беспокойству, чем сидящие на высоких присадах [27], степень сытости (голодные птицы подпускают людей ближе, чем сытые [28], возраст птиц (взрослые более осторожны, чем молодые [23], климатические факторы, степень урбанизации и масса особей [29]. Кроме того, свою роль может играть привыкание: птицы способны адаптироваться к беспокойству, если оно носит умеренный характер [23].

В итоге, из-за действия множества факторов, которые сложно учесть, в разных исследованиях оценки дистанции вспугивания для одного и того же вида могут значительно различаться, поэтому на практике стараются обобщить все сведения о виде и дать общие рекомендации по размеру буферных зон (отдельно в гнездовое и не гнездовое время) [30].

Согласно нашим результатам, уязвимость птиц к беспокойству в гнездовое время определяется периодом большей уязвимости, поэтому из двух радиусов, определенных для весны и для лета, выбираем наибольший, весенний (ведь если гнездование той или иной пары было прервано весной, то защитные меры, принятые летом, уже никакого эффекта не дадут). Он составляет 500 м.

Для сравнения возьмем литературные данные для орлана-белохвоста. В отчете [30] цитируется много рекомендаций по организации буферных зон для орлана-белохвоста в Европе. Медианная дистанция вспугивания составляет 125–225 м, 80 % всей выборки укладывается в интервал 50–1000 м [1, 31]. Рекомендуемые размеры буферных зон в гнездовой сезон

варьируют в зависимости от локации и видов активности 50–2000 м. Однако общие рекомендации укладываются в диапазон 500–1000 м. В негнездовой сезон эта дистанция может быть сокращена в два раза (до 250–500 м). Для других крупных хищных птиц имеются следующие данные: для скопы медианная дистанция вспугивания составляет 125–225 м, рекомендуемые размеры буферных зон в гнездовой период составляют 350–750 м. Для беркута медианная дистанция вспугивания составляет 225–400 м, рекомендуемые радиусы буферных зон – 750–1000 м [30]. Видим, что эти результаты хорошо совпадают с литературными и вписываются в общую информационную канву.

Заключение

Одно из основных назначений математического моделирования заключается в том, чтобы реконструировать взаимосвязи между объектами там, где прямой эксперимент невозможен или нежелателен. Именно поэтому наличие пропущенных, цензурированных и неточных данных не является препятствием для моделирования, напротив – это признак того, что здесь необходим модельный подход. Данный тезис в полной мере относится к изучению поведения редких и уязвимых видов птиц, когда крайне важно минимизировать воздействие исследовательского пресса, но задачи охраны этих видов требуют количественных оценок элементов поведения этих видов.

Наш опыт показал целесообразность использования математического аппарата анализа выживаемости к оценке реакции птиц на беспокойство. Это позволяет скорректировать методику в сторону уменьшения беспокойства изучаемых видов. Возникающие при этом цензурированные данные не отбрасываются, а используются для моделирования реакции избегания птиц. Апробированный нами щадящий метод анализа реакции птиц на беспокойство является альтернативой традиционному подходу, основанному на вспугивании всех птиц, и рекомендуется для применения при мониторинге популяций редких и уязвимых видов и проведении экологических экспертиз.

Список литературы

1. Ruddock M., Whitfield D. P. A review of disturbance distances in selected bird species / A report from Natural Research (Projects) Ltd to Scottish Natural Heritage, 2007.
2. Livezey K. B., Fernández-Juricic E., Blumstein D. T. Database of bird flight initiation distances to assist in estimating effects from human disturbance and delineating buffer areas // Journal of Fish and Wildlife Management. 2016. Vol. 7 (1). P. 181–191. doi: 10.3996/082015-JFWM-078
3. Goodship N. M., Furness R. W. Disturbance distances review: An updated literature review of disturbance distances of selected bird species / NatureScot Research Report 1283, 2022.
4. Ydenberg R. C., Dill L. M. The economics of fleeing from predators // Advances in the Study of Behavior. 1986. Vol. 16. P. 229–249. doi: 10.1016/S0065-3454(08)60192-8
5. de Resende N. C., Teixeira C. P., de Azevedo C. S. Flight Initiation distance in an urban bird: influence of the number of people, gaze orientation, and bird behavior // Birds. 2024. Vol. 5. P. 255–264. doi: 10.3390/birds5020017
6. Hammer T. L., Bize P., Saraux C. [et al.]. Repeatability of alert and flight initiation distances in king penguins: Effects of colony, approach speed, and weather // Ethology. 2022. Vol. 128. P. 303–316. doi: 10.1111/eth.13264
7. Bateman P. W., Fleming P. A. Who are you looking at? Hadeda ibises use direction of gaze, head orientation and approach speed in their risk assessment of a potential predator // Journal of Zoology. 2011. Vol. 285. P. 316–323. doi: 10.1111/j.1469-7998.2011.00846.x
8. Hensel D. R. Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab and R. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2012. 344 p. doi: 10.1002/9781118162729
9. Bewick V., Cheek L., Ball J. Statistics review 12: Survival analysis // Critical Care. 2004. Vol. 8. P. 389–394. doi: 10.1186/cc2955
10. Cain K. C., Harlow S. D., Little R. J. [et al.]. Bias due to left truncation and left censoring in longitudinal studies of developmental and disease processes // American Journal of Epidemiology. 2011. Vol. 173 (9). P. 1078–1084. doi: 10.1093/aje/kwq481
11. Nordell C. J., Wellicome T. I., Bayne E. M. Flight initiation by Ferruginous Hawks depends on disturbance type, experience, and the anthropogenic landscape // PLoS ONE. 2017. Vol. 12 (5). e0177584. doi: 10.1371/journal.pone.0177584
12. Romanov M. S., Masterov V. B. Low breeding performance of the Steller's sea eagle (*Haliaeetus pelagicus*) causes the populations to decline // Ecological modelling. 2020. Vol. 420. 108877. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.108877
13. BirdLife International. *Haliaeetus pelagicus* / The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T22695147A204871862, 2021. doi: 10.2305/IUCN.UK.2021-3.RLTS.T22695147A204871862.en
14. Мастеров В. Б., Романов М. С. Тихоокеанский орлан *Haliaeetus pelagicus*: экология, эволюция, охрана. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2014. 384 с.

15. Livezey K. B., Blumstein D. T. "Shortest-distance" method is more accurate than conventional method in estimating flight initiation distances for close, perched birds // Journal of Ornithology. 2016. Vol. 157. P. 923–925. doi: 10.1007/s10336-016-1337-3
16. Dudley W. N., Wickham R., Coombs N. An Introduction to Survival Statistics: Kaplan-Meier Analysis // Journal of Advanced Practitioner in Oncology. 2016. Vol. 1. P. 91–100. doi: 10.6004/jadpro.2016.7.1.8
17. Riffenburgh R. H. Survival and Time-Series Analysis / Chapter 25 in: Statistics in Medicine. 2nd ed. Academic Press, 2006. P. 487–519. doi: 10.1016/B978-012088770-5/50065-4
18. Manly B. F. J. Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology. 3rd ed. Boca Raton : Chapman & Hall/CRC, 2006.
19. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing / R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. URL: https://www.R-project.org
20. Therneau T. A Package for Survival Analysis in R. R package version 3.2-13. 2021. URL: https://CRAN.R-project.org/package=survival
21. Grubb T. G., Bowerman W. W., Giesy J. P., Dawson G. A. Responses of breeding Bald Eagles, Haliaeetus leucocephalus, to human activities in northcentral Michigan // Canadian Field-Naturalist. 1992. Vol. 106. P. 443–453. doi: 10.5962/p.357030
22. Stalmaster M. V., Kaiser J. L. Effects of Recreational Activity on Wintering Bald Eagles // Wildlife Monographs. 1998. Vol. 137. P. 1–46.
23. Stalmaster M. V., Newman J. R. Behavioral Responses of Wintering Bald Eagles to Human Activity // Journal of Wildlife Management. 1978. Vol. 42. P. 506–513. doi: 10.2307/3800811
24. Miller R. C. The significance of the gregarious habit // Ecology. 1922. Vol. 3. P. 122–126. doi: 10.2307/1929145
25. Fraser J. D., Frenzel L. D., Mathisen J. E. The impact of human activities on breeding bald eagles in north-central Minnesota // Journal of Wildlife Management. 1985. Vol. 49. P. 585–892. doi: 10.2307/3801676
26. Masterov V. B., Romanov M. S., Sale R. G. Steller's Sea Eagle. Coberley, UK : Snowfinch Publishing, 2018. 384 p.
27. Knight R. L., Knight S. K. Responses of wintering bald eagles to boating activity // Journal of Wildlife Management. 1984. Vol. 48. P. 999–1004. doi: 10.2307/3801456
28. Skagen S. K. Behavioral responses of wintering bald eagles to human activity / ed. by R. L. Knight, G. T. Allen, M. V. Stalmaster, C. W. Servheen // Proceedings of the Washington Bald Eagle Symposium. Seattle : The Nature Conservancy, 1980. P. 231–241.
29. Díaz M., Grim T., Markó G. [et al.]. Effects of climate variation on bird escape distances modulate community responses to global change // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. P. 12826. doi: 10.1038/s41598-021-92273-1
30. Goodship N., Furness R. W. Seaweed hand-harvesting: literature review of disturbance distances and vulnerabilities of marine and coastal birds / Scottish Natural Heritage Research Report. 2019. № 1096.
31. Whitfield D. P., Ruddock M., Bullman R. Expert opinion as a tool for quantifying bird tolerance to human disturbance // Biological conservation. 2008. Vol. 141. P. 2708–2717. doi: 10.1016/j.biocon.2008.08.007

References

1. Ruddock M., Whitfield D.P. *A review of disturbance distances in selected bird species*. A report from Natural Research (Projects) Ltd to Scottish Natural Heritage, 2007.
2. Livezey K.B., Fernández-Juricic E., Blumstein D.T. Database of bird flight initiation distances to assist in estimating effects from human disturbance and delineating buffer areas. *Journal of Fish and Wildlife Management*. 2016;7(1):181–191. doi: 10.3996/082015-JFWM-078
3. Goodship N.M., Furness R.W. *Disturbance distances review: An updated literature review of disturbance distances of selected bird species*. NatureScot Research Report 1283, 2022.
4. Ydenberg R.C., Dill L.M. The economics of fleeing from predators. *Advances in the Study of Behavior*. 1986;16:229–249. doi: 10.1016/S0065-3454(08)60192-8
5. de Resende N.C., Teixeira C.P., de Azevedo C.S. Flight Initiation distance in an urban bird: influence of the number of people, gaze orientation, and bird behavior. *Birds*. 2024;5:255–264. doi: 10.3390/birds5020017
6. Hammer T.L., Bize P., Saraux C. et al. Repeatability of alert and flight initiation distances in king penguins: Effects of colony, approach speed, and weather. *Ethology*. 2022;128:303–316. doi: 10.1111/eth.13264
7. Bateman P.W., Fleming P.A. Who are you looking at? Hadeda ibises use direction of gaze, head orientation and approach speed in their risk assessment of a potential predator. *Journal of Zoology*. 2011;285:316–323. doi: 10.1111/j.1469-7998.2011.00846.x
8. Hensel D.R. *Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab and R*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012:344. doi: 10.1002/9781118162729
9. Bewick V., Cheek L., Ball J. Statistics review 12: Survival analysis. *Critical Care*. 2004;8:389–394. doi: 10.1186/cc2955
10. Cain K.C., Harlow S.D., Little R.J. et al. Bias due to left truncation and left censoring in longitudinal studies of developmental and disease processes. *American Journal of Epidemiology*. 2011;173(9):1078–1084. doi: 10.1093/aje/kwq481
11. Nordell C.J., Wellicome T.I., Bayne E.M. Flight initiation by Ferruginous Hawks depends on disturbance type, experience, and the anthropogenic landscape. *PLoS ONE*. 2017;12(5):e0177584. doi: 10.1371/journal.pone.0177584

12. Romanov M.S., Masterov V.B. Low breeding performance of the Steller's sea eagle (Haliaeetus pelagicus) causes the populations to decline. *Ecological modelling*. 2020;420:108877. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.108877
13. *BirdLife International. Haliaeetus pelagicus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T22695147A204871862, 2021. doi: 10.2305/IUCN.UK.2021-3.RLTS.T22695147A204871862.en
14. Masterov V.B., Romanov M.S. *Tikhookeanskiy orlan Haliaeetus pelagicus: ekologiya, evolyutsiya, okhrana = Pacific eagle Halaetus pelagicus: ecology, evolution, conservation*. Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014:384. (In Russ.)
15. Livezey K.B., Blumstein D.T. "Shortest-distance" method is more accurate than conventional method in estimating flight initiation distances for close, perched birds. *Journal of Ornithology*. 2016;157:923–925. doi: 10.1007/s10336-016-1337-3
16. Dudley W.N., Wickham R., Coombs N. An Introduction to Survival Statistics: Kaplan-Meier Analysis. *Journal of Advanced Practitioner in Oncology*. 2016;1:91–100. doi: 10.6004/jadpro.2016.7.1.8
17. Riffenburgh R.H. *Survival and Time-Series Analysis*. Chapter 25 in: Statistics in Medicine. 2nd ed. Academic Press, 2006:487–519. doi: 10.1016/B978-012088770-5/50065-4
18. Manly B.F.J. *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology*. 3rd ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2006.
19. *R Core Team. R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. Available at: https://www.R-project.org
20. Therneau T. *A Package for Survival Analysis in R. R package version 3.2-13*. 2021. Available at: https://CRAN.R-project.org/package=survival
21. Grubb T.G., Bowerman W.W., Giesy J.P., Dawson G.A. Responses of breeding Bald Eagles, Haliaeetus leucocephalus, to human activities in northcentral Michigan. *Canadian Field-Naturalist*. 1992;106:443–453. doi: 10.5962/p.357030
22. Stalmaster M.V., Kaiser J.L. Effects of Recreational Activity on Wintering Bald Eagles. *Wildlife Monographs*. 1998;137:1–46.
23. Stalmaster M.V., Newman J.R. Behavioral Responses of Wintering Bald Eagles to Human Activity. *Journal of Wildlife Management*. 1978;42:506–513. doi: 10.2307/3800811
24. Miller R. C. The significance of the gregarious habit. *Ecology*. 1922;3:122–126. doi: 10.2307/1929145
25. Fraser J.D., Frenzel L.D., Mathisen J.E. The impact of human activities on breeding bald eagles in north-central Minnesota. *Journal of Wildlife Management*. 1985;49:585–892. doi: 10.2307/3801676
26. Masterov V.B., Romanov M.S., Sale R.G. *Steller's Sea Eagle*. Coberley, UK: Snowfinch Publishing, 2018:384.
27. Knight R.L., Knight S.K. Responses of wintering bald eagles to boating activity. *Journal of Wildlife Management*. 1984;48:999–1004. doi: 10.2307/3801456
28. Skagen S.K. Behavioral responses of wintering bald eagles to human activity. Ed. by R.L. Knight, G.T. Allen, M.V. Stalmaster, C.W. Servheen. *Proceedings of the Washington Bald Eagle Symposium*. Seattle: The Nature Conservancy, 1980:231–241.
29. Díaz M., Grim T., Markó G. et al. Effects of climate variation on bird escape distances modulate community responses to global change. *Scientific Reports*. 2021;11:12826. doi: 10.1038/s41598-021-92273-1
30. Goodship N., Furness R.W. Seaweed hand-harvesting: literature review of disturbance distances and vulnerabilities of marine and coastal birds. *Scottish Natural Heritage Research Report*. 2019;(1096).
31. Whitfield D.P., Ruddock M., Bullman R. Expert opinion as a tool for quantifying bird tolerance to human disturbance. *Biological conservation*. 2008;141:2708–2717. doi: 10.1016/j.biocon.2008.08.007