

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОВЕДЕНИЯ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

© 2024 г. Е. А. Березина^{а,*}, А. Н. Гилёв^{а,**}, К. А. Каренина^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: herionnee@gmail.com

**e-mail: a.gilev@spbu.ru

Поступила в редакцию 08.09.2023 г.

После доработки 28.04.2024 г.

Принята к публикации 03.05.2024 г.

С момента появления и широкого распространения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) они все чаще применяются для учета численности, оценки распространения и наблюдения за поведением наземных и водных животных. Этот метод активно используется в исследованиях млекопитающих. Разнообразие и относительная доступность беспилотников позволяют использовать их для достижения разнообразных исследовательских задач. Применение БПЛА имеет как свои преимущества, так и недостатки, обсуждению которых посвящен этот обзор. В работе обсуждаются преимущества использования БПЛА по сравнению с другими методами — это новые возможности для исследований и достоинства современных инструментов анализа, таких как автоматизация и использование искусственного интеллекта в анализе. Рассмотрены технические ограничения БПЛА и негативное воздействие этого метода на млекопитающих. Подчеркнута необходимость минимизации беспокойства животных при проведении исследований. Отдельно в работе обобщен опыт применения БПЛА в исследованиях териофауны России.

Ключевые слова: дроны, мониторинг, наблюдение, аэросъемка

DOI: 10.31857/S0044513424040117, **EDN:** UXFRZM

Современные биологические исследования всё чаще включают использование различных типов беспилотных аппаратов (летающих, перемещающихся по различным поверхностям, под водой). Беспилотные летательные аппараты (БПЛА, дроны, беспилотники) получили наиболее широкое распространение в исследованиях животных и используются для решения самых разнообразных задач. За последние десятилетия БПЛА, применению которых посвящен данный обзор, изменили и в некоторой степени революционизировали подход к наблюдениям за животными благодаря предоставлению платформы для неинвазивного изучения отдельных аспектов биологии видов, в том числе оценки численности, распространения и поведения животных в естественной среде обитания (Schad, Fischer, 2022). Область применения БПЛА постепенно расширяется за счет постоянного совершенствования как несущих платформ, так и навесного оборудования: от фото- и видеокамер разного спектра до приборов спутниковой навигации и позиционирования (López, Mulero-Pázmány, 2019). Перспективным является использование БПЛА для изучения поведения животных в естественной среде обитания, в первую очередь

благодаря тому, что это позволяет исследователям наблюдать за ранее скрытыми типами поведения, изменять перспективу точки наблюдения, например, на взгляд “сверху”. Беспилотники могут быть использованы на труднодоступной местности, в сложных погодных условиях и пр. с минимальным риском для исследователей, при этом, как правило, снижаются трудозатраты и стоимость сбора материала.

Широкому распространению БПЛА способствовали низкая стоимость в сочетании с высоким качеством получаемого материала. Беспилотник может сохранять достаточную высоту, чтобы проводить наблюдения одновременно за несколькими животными в группе без снижения качества изображения из-за помех, например облачности (Linchant et al., 2015; Xiang, Tian, 2011).

БПЛА не заменяют другие способы наблюдения за животными, так как имеют недостатки: ограниченное время работы (Pollock et al., 2022), зависимость от погодных условий и создаваемый шум, который влияет на животных и их поведение (Christie et al., 2016). Важно, что беспилотники можно применять лишь на открытой или полуоткрытой

местности. В настоящий момент гражданские тепловизоры на БПЛА, например, не могут заменить наземные наблюдения при изучении лесных видов. Частично это возможно в зимнее время в листопадных лесах, но при низких температурах в результате быстрой разрядки батареи продолжительность работы ограничена.

На данный момент большинство исследователей используют БПЛА для учета численности и оценки распространения животных (Corcoran et al., 2021; Schofield et al., 2019); при мониторинге популяций редких видов; как средство профилактики и предотвращения браконьерства (Jewell et al., 2020; López, Mulero-Pázmány, 2019; Mulero-Pázmány et al., 2014). Наблюдения с помощью квадрокоптеров активно используются и для мониторинга сельскохозяйственных животных, например таких как домашний бык (*Bos taurus* L. 1758) (Mufford et al., 2019; Nyamuryekung'e et al., 2016; Mulero-Pázmány et al., 2015) и домашняя овца (*Ovis aries* L. 1758) (Al-Thani et al., 2020). Эти аппараты оказались особенно эффективны при изучении пространственной динамики перемещения отдельных особей в группах (Maeda et al., 2021; Mufford et al., 2019) и фиксации ранее незарегистрированных поведенческих проявлений (Pollock et al., 2022). Наибольшее распространение беспилотники получили при изучении млекопитающих, именно этой таксономической группе посвящено большинство научных исследований, в которых приближение к животным проводили с помощью БПЛА (Мо, Vonatakis, 2022). В последнее время все чаще беспилотники используют в исследованиях поведения (например, Беликов и др., 2018).

В задачи данного обзора входило описание разнообразия типов беспилотных летательных аппаратов и вариантов их использования в современных зоологических исследованиях млекопитающих, анализ преимуществ и недостатков этого метода. Особое внимание уделено негативному влиянию БПЛА при проведении научной работы на млекопитающих и способам его минимизации. Отдельная глава посвящена опыту применения беспилотников для проведения исследований млекопитающих в России. Обзор направлен не на всеобъемлющее раскрытие каждой из рассматриваемых тем, здесь в сжатом виде приведены обобщения результатов предыдущих работ, касающихся исследования разных аспектов биологии млекопитающих с помощью БПЛА.

ТИПЫ БПЛА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ИССЛЕДОВАНИЯХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Под понятием “беспилотные летательные аппараты” – БПЛА – подразумевается весь спектр автономных летательных аппаратов: от небольших гражданских до стратегических с массой,

превышающей 600 кг. В научных изысканиях наиболее часто используются именно малые недорогие аппараты, доступные для гражданского населения (рис. 1). Размах крыльев-винтов таких аппаратов в среднем не превышает двух метров, управляет аппаратом один оператор (Lee, 2004). Небольшие аппараты привлекают меньше внимания животных и, соответственно, причиняют меньше беспокойства (Lee, 2004).

Наиболее часто используемые в исследованиях животных БПЛА можно разделить на две категории: мультироторные летательные аппараты с винтами (коптеры) и аппараты с неподвижным крылом (самолетного типа). Мультироторные летательные аппараты способны производить вертикальный подъем и посадку, что облегчает их использование на участках с неровным рельефом (Hardin, Jensen, 2011; Niethammer et al., 2012). Они

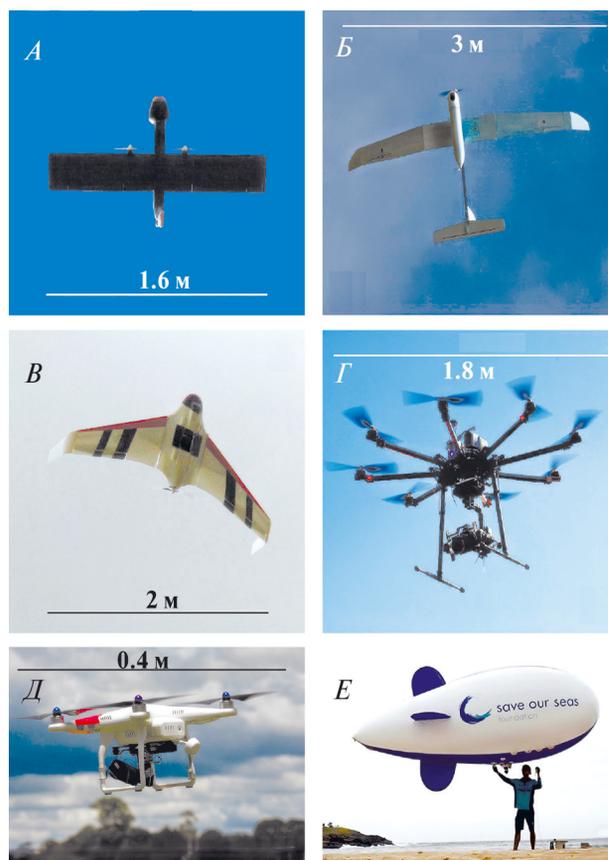


Рис. 1. Модели БПЛА, используемых для исследования животных: *А* – с фиксированным крылом Avian-P, *Б* – с неподвижным крылом Skylark II, *В* – с фиксированным крылом и толкающим винтом Topodrone-100, *Г* – многороторного (октокоптер) типа Kraken-130, *Д* – многороторного (квадрокоптер) типа Phantom, *Е* – типа дирижабль Harry Win HWEA5202. Иллюстрации находятся под открытой лицензией на повторное использование: *А* – *Г* – по: McEvoy et al., 2016; *Е* – по: Adams et al., 2020.

способны зависать в воздухе над объектом и могут быть использованы при съемке поведения малоподвижных животных или в случае необходимости при поиске животных в “сложном” ландшафте, затрудняющем визуальное распознавание объекта исследователем. Например, октокоптер (БПЛА с восьмью роторами) был использован при разработке системы поиска детенышей косули (*Capreolus capreolus* L. 1758) на полях перед покосом — остановка в полете позволяла оператору рассмотреть поле и найти детеныша, скрывающегося в высокой траве (Israel, 2011). Однако в ситуациях, когда необходимо предварительно затратить время на поиск животных, например скрытных, обитающих в сложных ландшафтах (например, в лесах) или имеющих сильно разреженную структуру популяции, проявляется один из недостатков роторных аппаратов — ограниченное время работы коптера, в основном 12–40 мин (Colefax et al., 2018), что обусловлено небольшой емкостью аккумулятора (Serin, Chur, 2022). Кроме того, работа коптеров зависит от метеорологических условий — мультироторный БПЛА не рекомендуется использовать в ветреную погоду и при осадках (дождь, снег) (Grenzdörffer, 2013). Таким образом, мультироторные аппараты применимы для наблюдения за животными в заранее известных местах скопления или местах пребывания единичных особей, а также для полетов на небольшие расстояния, но не подходят для выполнения некоторых поисковых задач.

БПЛА самолетного типа, в свою очередь, способны летать на большие расстояния (время полета до нескольких часов). Они обладают большей скоростью полета, что особенно полезно для учета животных, так как позволяет получить картину расположения особей на определенной территории за короткий промежуток времени и без необходимости подзарядки (Mulero-Pázmány et al., 2014). Минусами таких БПЛА являются низкая маневренность и отсутствие возможности зависания над объектом. Кроме того, для запуска и посадки некоторых БПЛА необходимы специальные устройства или площадки. Например, летательный аппарат, использованный в мониторинге популяции слонов, был оборудован высокочастотным передатчиком с областью действия до 180 км для поиска аппарата в случае аварийного отключения GPS-систем, а для посадки ему была необходима ровная площадка без растительности размером не менее 150×30 м (Vermeulen et al., 2013). Соответственно, подобные устройства наиболее эффективны при поисковых задачах и для мониторинга и учета численности крупных популяций животных.

Большинство БПЛА для движения приводных электромоторов используют электричество аккумуляторов (Linchant et al., 2015). Преимуществом

такого источника энергии является более низкий уровень шума. В других аппаратах используются двигатели внутреннего сгорания (как для привода тяговых винтов, так и для работы электрогенераторов) — это обеспечивает большую длительность полетов, например до 20 ч (Koski et al., 2009), но и создает более высокий уровень шума и угрозу возгорания подобных аппаратов (Lee, 2004).

Управление БПЛА чаще осуществляется в режиме реального времени оператором с земли по радиоканалу. Визуальный контроль полета осуществляется либо путем непосредственного наблюдения за аппаратом, который находится в поле зрения оператора, либо, что встречается гораздо чаще, удаленно с помощью камеры, встроенной в корпус БПЛА, и с учетом данных полетной телеметрии, передающихся на пульт оператора (Colefax et al., 2019; Kelaher et al., 2020). Для некоторых аппаратов можно запрограммировать траекторию его перемещения, основываясь на заранее введенных GPS-точках (часто такой маршрут оператор может изменять в режиме реального времени).

В качестве используемого подвесного или встроенного оборудования БПЛА, задействованного в исследованиях животных, чаще всего выступают фото/видео камеры видимого диапазона и тепловизоры (Linchant et al., 2015; Костин, 2019). Камеры видимого диапазона даже на небольших БПЛА для гражданского использования могут иметь высокое качество изображения. Встроенные камеры обладают возможностью потоковой передачи видеосигнала на пульт управления или на смартфон оператора, связанный с беспилотником. Это позволяет не только контролировать полет, но и снимать видео, делать фотоснимки в ходе полета. При видеосъемке качество изображения ниже, чем при фотосъемке (Mulero-Pázmány et al., 2014). Выбор видеокамеры является компромиссом между стоимостью, весом камеры и минимальным необходимым для исследования пространственным разрешением. Для работы в темноте используются БПЛА, оснащенные тепловизионными камерами (Israel, 2011; Mulero-Pázmány et al., 2014). Подобная аппаратура применима, когда температура подстилающей поверхности сильно отличается от температуры тела исследуемых животных, что позволяет отличить их от фона. Однако для тепловизионных камер существует ограничение, связанное с разрешающей способностью сенсоров. Например, при высоте полета в 150 м с использованием камеры с разрешением матрицы 640×480 пикселей удалось идентифицировать такие крупные виды, как благородный олень (*Cervus elaphus* L. 1758) и кабан (*Sus scrofa* L. 1758), причем на успешность определения влияла не только длина тела, но и его форма, так как кабанов удавалось идентифицировать благодаря почти незаметной при низком разрешении

изображения голове и широком теле. В свою очередь, идентификация косуль на такой высоте была затруднена из-за небольших размеров тела – их можно было спутать с другими, более мелкими животными или человеком (Witczuk et al., 2017). Другим ограничением является сложность в определении вида особей примерно одинаковых размеров, например западного серого кенгуру (*Macropus fuliginosus* Desmarest 1817), гигантского кенгуру (*Macropus giganteus* Shaw 1790) и большого рыжего кенгуру (*Osphranter rufus* (Desmarest 1822)), которых не удавалось отличать друг от друга по изображениям с тепловизионной камеры при учетах численности в штате Виктория, Австралия (Lethbridge et al., 2019).

В исследованиях на млекопитающих могут использоваться и более нестандартные варианты подвешенного оборудования БПЛА. Например, при изучении китообразных (Cetacea) используют подвешенные к коптерам гидрофоны для записи акустических сигналов животных (Frouin-Mouy et al., 2020) и устройства для захвата фонтанов, образуемых выдохами китов, для определения состава их микробиоты (Pirota et al., 2017). Дрон с мультиспектральной камерой использовался для разработки методов обнаружения белых медведей на различном типе фона (Chabot et al., 2019).

Таким образом, существующие модели БПЛА с учетом возможности их модифицирования позволяют выполнять разнообразные исследовательские задачи в достаточно широком диапазоне окружающих условий. Основными типами беспилотников, используемых в исследованиях млекопитающих являются мультироторные аппараты и аппараты с неподвижным крылом, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Выбор БПЛА для каждого конкретного исследования следует проводить с учетом особенностей объектов исследования (подробнее см. раздел “Влияние БПЛА на млекопитающих”) и параметров данных, которые необходимо получить.

ПРЕИМУЩЕСТВА БПЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Анализ 169 исследовательских работ (не обзоров), в которых приближение к диким животным проводили с помощью БПЛА, за период с 2000 по 2020 г. показал, что 95 работ были посвящены изучению млекопитающих, 64 работы были посвящены птицам, 15 работ – рептилиям и 15 – пластинчатожаберным рыбам (Mo, Vonatakis, 2022). Широкое использование этого сравнительно “молодого” метода в исследованиях именно млекопитающих, очевидно, связано с его определенными преимуществами по сравнению с другими методами и подходами.

Преимущества БПЛА по сравнению с другими методами

Для многих видов исследований млекопитающих аэросъемка является либо единственно возможным, либо оптимальным методом сбора материала. Например, вид сверху на большое число особей часто необходим при проведении учетов численности, изучении пространственной структуры крупных агрегаций, наблюдении за быстро перемещающимися группами животных. Ранее значительным ограничением для проведения таких исследований, например, с самолета, вертолета или аэростата была их дороговизна (Wang et al., 2019). Одним из важнейших преимуществ использования малых БПЛА является их относительно низкая стоимость и, соответственно, доступность, особенно в сравнении с использованием пилотируемых летательных аппаратов. Разнообразие видов дронов позволяет подобрать аппарат (выбрать необходимую техническую конфигурацию) под многие исследовательские нужды и разнообразный бюджет (Anderson, Gaston, 2013; Wang et al., 2019). Относительная простота устройства БПЛА позволяет некоторым исследователям собирать и комплектовать их самостоятельно, что также снижает затраты и увеличивает оперативность ремонта (Mesquita et al., 2021). Кроме того, для управления пилотируемым аппаратом необходимо привлечение к работе дополнительных специалистов, в то время как управление БПЛА (особенно роторных) требует минимум специальных навыков, которые исследователь может получить самостоятельно.

Важным преимуществом БПЛА перед пилотируемыми летательными аппаратами является возможность летать на небольшой высоте, на которой встроенные камеры позволяют получать изображения высокого качества (по сравнению с изображениями, полученными со спутника) (Linchant et al., 2015; Xiang, Tian, 2011). Высокое качество получаемого изображения (разрешением на местности до 4К) вместе с возможностью записывать видеофайлы с высокой частотой кадров (до 30 кадров/с) позволяют исследователям определять пол и возраст животных (Mufford et al., 2019; Rathore et al., 2023), индивидуально идентифицировать особей (Pollock et al., 2022), разделять разные типы активности, в том числе регистрировать условия внешней среды, окружающую животных обстановку, например присутствие конспецификов (Goldbogen et al., 2017; Torges et al., 2018). БПЛА можно оборудовать сенсорами, которые дополняют получаемые изображения, например, фотографиями, полученными в инфракрасном диапазоне (López, Mulero-Pázmány, 2019).

Беспилотники обладают преимуществами при съемках крупных агрегаций или удаленных групп в сравнении с наблюдениями с земли, из лодок или

из пилотируемых аппаратов — обеспечивают более высокую точность при подсчете особей, их категоризации и идентификации (Hodgson et al., 2016, 2018). Например, при сравнении результатов подсчетов калифорнийских морских львов (*Zalophus californianus* (Lesson 1828)) с лодки и с БПЛА при использовании беспилотника удалось обнаружить большее количество животных и с большей точностью категоризировать их по возрасту и полу (Adame et al., 2017). Подсчеты щенков капских морских котиков (*Arctocephalus pusillus doriferus* Wood Jones 1925) с БПЛА позволили учесть на 20–32% больше особей, чем при подсчете с земли (McIntosh et al., 2018).

Немаловажным преимуществом БПЛА по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами являются небольшие размеры и низкий уровень производимого шума. Это позволяет минимизировать влияние беспилотников на животных и их поведение, если исследователи соблюдают определенные правила съемки животных, например поддерживают достаточную высоту, учитывают направление ветра и распространение шума (Christie et al., 2016; Dittmer et al., 2015). Некоторые животные быстро привыкают к звуку дронов, проводящих съемку. Целенаправленное исследование скорости привыкания барibalов (*Ursus americanus* Pallas 1780), содержащихся в неволе, к пролетам БПЛА продемонстрировало привыкание медведей к подобному новому стимулу в течение относительно короткого промежутка времени (три-четыре недели). При этом животные, содержащиеся в неволе, в целом более толерантны к любому человеческому вмешательству (Dittmer et al., 2019). Крупный рогатый скот демонстрировал привыкание к пролетам БПЛА в течение трех дней в ходе исследования, направленного на изучение пространственной структуры групп (Mufford et al., 2019). Привыкание к БПЛА млекопитающих в природе требует дальнейших исследований. Разные беспилотники производят шум разной интенсивности и в разных частотных диапазонах в зависимости от размера винтов, типа двигателя и других параметров. Подбор наиболее подходящего типа БПЛА с точки зрения его шумовых характеристик для исследования конкретных видов может быть перспективным направлением будущих работ в этой области.

Дополнительным преимуществом использования БПЛА в исследованиях млекопитающих является его относительная безопасность для исследователя. Крушение пилотируемых летательных аппаратов — одна из частых причин смерти полевых биологов в США (Sasse, 2003). Также очевидно, что большая безопасность использования БПЛА по сравнению с прямым наблюдением за животными, например белым медведем (*Ursus maritimus* Phipps 1774) (Jagielski et al., 2022). Кроме того, опасным может быть и само перемещение исследователя в

труднодоступных местах, где обитают некоторые виды (Christie et al., 2016; Linchant et al., 2015). Благодаря дистанционному управлению БПЛА, этих угроз удается избежать — некоторые беспилотники могут удаляться от оператора на расстояние до нескольких километров (Hughes et al., 2018).

Можно заключить, что БПЛА обладают рядом очевидных преимуществ по сравнению с другими более традиционными методами сбора материала. Относительная доступность беспилотников сочетается с возможностью получать изображения высокого качества. Точность и информативность получаемых с применением БПЛА данных часто превосходит таковые при использовании других традиционных методов учётов и наблюдений за млекопитающими. Важными преимуществами беспилотников по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами являются низкий уровень производимого шума и относительная безопасность для исследователя.

Новые возможности БПЛА

Использование БПЛА позволяет проводить детальные и разносторонние исследования млекопитающих, которые ранее не проводились. Например, параллельное использование двух коптеров — одного с подвешенным гидрофоном и второго, оборудованного стандартной камерой видимого спектра, — позволило получить уникальные данные о связи поведения с акустическими сигналами серых китов (*Eschrichtius robustus* Lilljeborg 1861) и о параметрах этих сигналов: источнике звука, его частотных и временных характеристиках (Frouin-Mouy et al., 2020). В эксперименте, направленном на изучение формирования альянсов у самцов индийских афалин (*Tursiops aduncus* (Ehrenberg 1833)), съемка с БПЛА проводилась синхронно с подводным динамиком, с помощью которого исследователи воспроизводили индивидуальные сигналы (свисты) самцов и регистрировали реакции в группе, краткосрочные и видимые только сверху (King et al., 2021). Нетонущий мультироторный БПЛА (рис. 2А, 2Б) также был использован для забора материала из фонтанов, образуемых выдохом горбатых китов (*Megaptera novaeangliae* Borowski 1781) на пути их миграции вблизи берегов Австралии (Pirota et al., 2017). На основании собранного материала удалось с высокой точностью определить состав микробиоты китового выдоха, который отражает состояние здоровья животного, а параллельная фотосъемка обеспечила индивидуальную идентификацию каждой исследованной особи. Состояние китов также удалось отследить по снимкам с дрона. Используя 3D-модель тела кита и данные о размерных характеристиках вида, авторы вычислили предполагаемые объем и массу тела каждой снятой с воздуха особи (Christiansen et al., 2019).

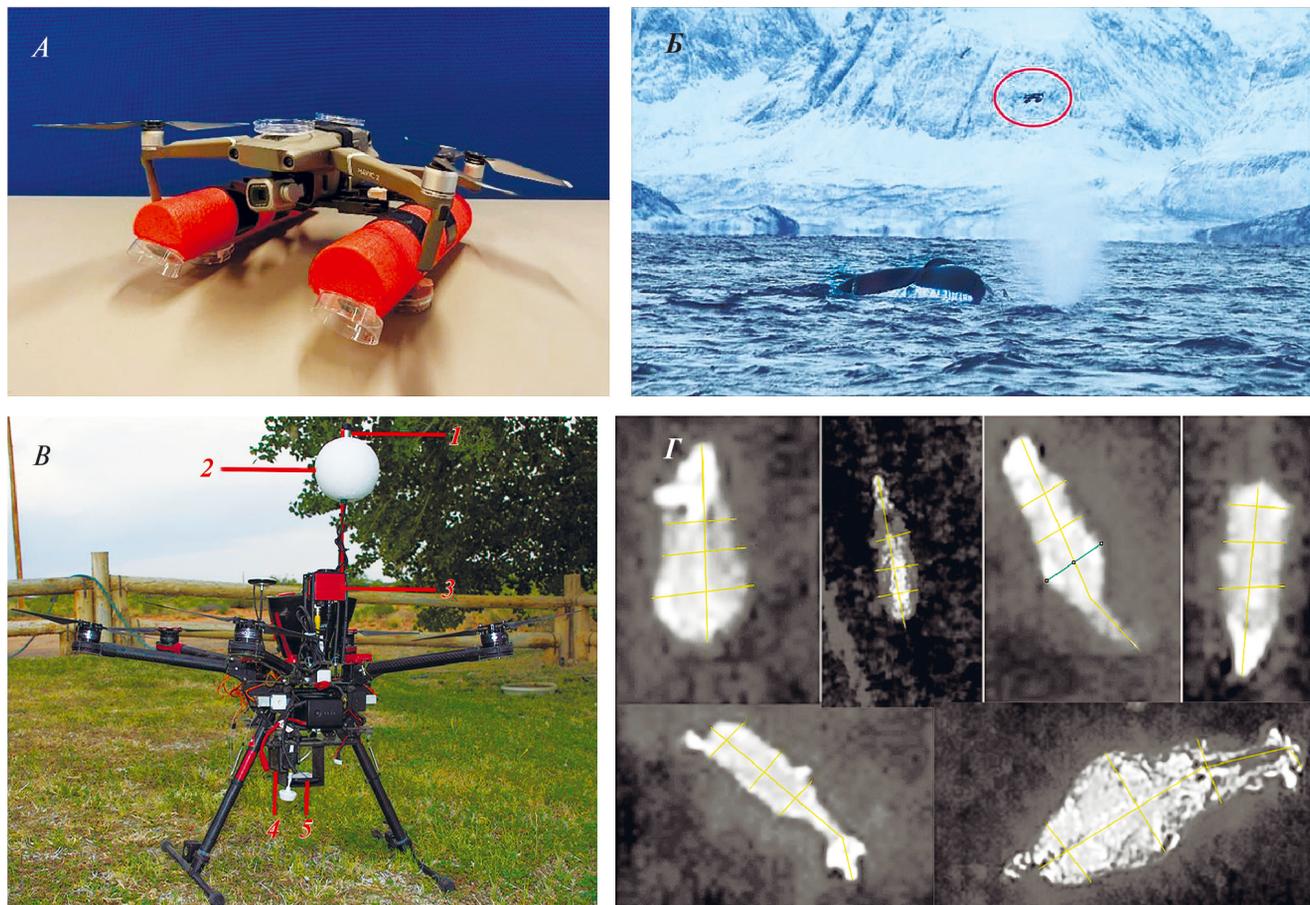


Рис. 2. БПЛА с дополнительными возможностями помимо штатной съемки. Исследование микрофлоры из выдоха горбатого кита: *А* – модифицированная модель дрона DJI Mavic Pro 2 с пенопластовыми поплавками и шестью закрепленными чашками Петри для (*Б*) взятия пробы (дрон в полете обозначен красным кругом). *В* – модификация гексакоптера DJI Spreading Wings S900 для записи ультразвука рукокрылых с параллельной тепловой видеосъемкой: *1* – ультразвуковой микрофон ULTRAMIC250K, *2* – шар из пенопласта для поглощения звука винтов, *3* – тепловизионная камера, *4* – рекордер для записи тепловизионных видео и *5* – рекордер для записи звука от летучих мышей. *Г* – использование тепловизора для исследования наземных млекопитающих разных видов в темное время суток, где видовую принадлежность успешно определяли по пропорциям тела на снимках теплового следа. Слева направо, верхний ряд: заяц, благородный олень, куница, барсук; нижний ряд: косуля и корова. Иллюстрации находятся под открытой лицензией на повторное использование: *А, Б* – Costa et al., 2022; *В* – Fu et al., 2018; *Г* – Larsen et al., 2023.

Особенностью роторных БПЛА является способность зависать над наблюдаемым объектом. Это позволяет регистрировать поведение животных с высокой точностью и детализацией. Например, в исследовании поведения диких собак-динго (*Canis lupus dingo* (Meyer 1793)) с помощью квадрокоптера были впервые зафиксированы особенности охоты динго на представителей семейства Кенгуровые (Macropodidae) и выполнено детальное описание взаимодействий матери и детеныша динго при совместной охоте (Pollock et al., 2022). Съемки с квадрокоптера дали возможность подробно исследовать паразитизм доминиканских чаек (*Larus dominicanus* Lichtenstein 1823) на южных гладких китах (*Eubalaena australis* (Desmoulins 1822))

и реакцию избегания такого паразитизма (Azizeh et al., 2021).

В последние годы беспилотники стали применяться для исследования млекопитающих, изучение определенных аспектов биологии которых ранее было затруднительным, например рукокрылых (Chiroptera). К примеру, был разработан аппарат с системой приспособлений, в том числе со сферическим микрофоном, которые физически изолируют шум БПЛА и записывают как ультразвуковой сигнал летучих мышей, так и их трехмерный тепловой след при полете (Fu et al., 2018; рис. 2*В*). Использование дрона с тепловизором также позволило детально исследовать распределение колониальных сероголовых летучих лисиц (*Pteropus*

poliocephalus Temminck 1825) во время отдыха на деревьях (McCarthy et al., 2021).

Таким образом, БПЛА предоставляют широкие возможности для решения нестандартных научных задач и позволяют исследовать малоизученные аспекты жизни млекопитающих в природе.

Автоматизация анализа материалов съемки с помощью БПЛА

В ходе всё более широкого внедрения съемки с БПЛА в научную работу происходит накопление зачастую огромных массивов материалов, которые требуют последующей обработки. Для того чтобы избежать значительных затрат на работу с такими материалами “вручную”, активно разрабатываются разнообразные автоматизированные или частично автоматизированные аналитические инструменты. Наличие успешно применяемых готовых решений и постоянное появление новых наработок в области автоматизации анализа фото- и видеоматериала, полученного с помощью БПЛА, — большое преимущество применения беспилотников.

В качестве примера эффективного использования алгоритмов автоматизированной идентификации млекопитающих можно привести исследование бегемотов (*Hippopotamus amphibious* L. 1758) при съемке тепловизионной камерой, установленной на БПЛА. Количество особей в воде было подсчитано следующим образом: алгоритм сравнивал длину тела исследуемого животного на снимках в инфракрасном диапазоне с шаблонной длиной тела бегемота в пикселях, заданной исследователем. Программа определяла бегемотов на снимках со средней ошибкой в 2% в сравнении с определением вручную, что делает ее достойной альтернативой подсчетам человеком (Lhoest et al., 2015).

Более сложный метод, объектно-ориентированный анализ изображений (object-based image analysis), использует алгоритм сегментации спектрально схожих пикселей, в результате которой складывается мозаика близкорасположенных объектов, каждый из которых получает собственную классификацию. Такой подход показал более высокую эффективность в определении животных на снимке с БПЛА, чем предыдущие алгоритмы (Corcogan et al., 2021). На этот тип анализа опирается ПО Trimble (eCognition Developer 8.7), которое оказалось эффективным в идентификации и подсчете крупных млекопитающих на мультиспектральных (видимого и инфракрасного спектра) видео. Программа лучше справилась с определением более крупных бизонов и вапити (*Cervus canadensis* (Erxleben 1777)), в то время как волков (*Canis lupus* L. 1758) и ланей (*Dama dama* (L. 1758)) она определяла с меньшей эффективностью. Авторы объясняют это криптической окраской меха последних, меньшими размерами тела, а также тем, что при комбинированном

анализе тепловизионной и обычной съемок температурные контуры нагретых камней и открытой почвы могли совпадать с контурами животных (Chrétien et al., 2015). Данная методика продемонстрировала эффективность также в распознавании белохвостых оленей (*Odocoileus virginianus* (Zimmermann 1780)) (Chrétien et al., 2016).

Другой алгоритм (detection of moving wild animals) основан на сравнении нескольких изображений, полученных летящим БПЛА, и был создан для регистрации перемещений диких животных. Сравнивая серию снимков, искусственный интеллект выделяет объекты, сменившие свое положение и переместившиеся в следующую позицию. Таким методом с точностью 77.3% был проведен учет пятнистых оленей (*Cervus nippon* Temminck 1838) в парке Нара в Японии, при этом алгоритм по точности даже превзошел человека, который обнаружил всего около 30% особей (Oishi et al., 2018). Однако авторы данного исследования отмечают, что данный алгоритм применим только на открытой местности или на территории, покрытой редколесьем, так как, например, передвижение верхушек деревьев из-за ветра также может считываться алгоритмом как перемещения животных.

Алгоритмы сверхточной нейронной сети (convolutional neural network), в отличие от описанных ранее более простых алгоритмов, используют спектральные характеристики пикселя и его близость с другими пикселями, объединяют эту информацию в матрицу, которая используется для выделения определенных “характеристик” объекта, и затем определяют схожесть объектов на снимке на основании близости этих характеристик (Corcogan et al., 2021). Сверхточная нейронная сеть, работающая со снимками крупных и средних млекопитающих, сделанными с БПЛА в заповеднике в Намибии, оказалась способна определять видовую принадлежность животных более чем 20 видов. Выдавая результат по 72 снимкам в секунду, алгоритмы оказались эффективны для мониторинга в режиме реального времени. При этом сверхточная нейросеть гораздо меньше зависит от особенностей фона, на котором сняты животные (Kellenberger et al., 2017). Использование алгоритмов активного обучения (active learning, AL), сильно повысило эффективность этого программного обеспечения в поиске крупных копытных за счет снижения трудозатрат на обучение нейросети. Для обучения алгоритма человеку потребовалось просмотреть всего 0.5% снимков, а эффективность нейросети в определении животных достигла почти 80% (Kellenberger et al., 2019).

Автоматизированные методы анализа изображений с БПЛА не ограничены целью собственно обнаружить животных. На сегодняшний день разработаны как отдельные автоматизированные программы, так и комплексное программное

обеспечение (ПО), которые осуществляют трудоемкую работу по сортировке идентификации и отслеживанию траектории движения отдельных особей, по классификации социальных контактов, измерению и отслеживанию дистанции между отдельными особями (рис. 3) и др. Автоматическое построение ортомозаик по сериям снимков с БПЛА позволило проанализировать взаимное расположение особей и описать социальную структуру в стадах крупного рогатого скота (Mufford et al., 2019), одичавших лошадей (Maeda et al., 2021).

В ПО Ethoflow задействованы алгоритмы видовой идентификации, отслеживания передвижения особей и их поведенческих актов на видеозаписях, выполненных сверху. Данное ПО имеет большие перспективы для использования с БПЛА. К примеру, с помощью Ethoflow по видеозаписям можно определить тесные контакты между особями (Bernardes et al., 2021). ПО DeepPoseKit, использующее алгоритмы глубокого обучения, оказалось эффективным в распознавании положения тел особей в разных условиях, в том числе в группах и при взаимодействиях особей между собой. Данное ПО было протестировано на видеозаписях поведения зебр Гриви (*Equus grevyi* Oustalet 1882), на которых оно эффективно определяло положение тела особи с очень высокой скоростью (Graving et al., 2019). Положение зебр Гриви при перемещениях в стаде также было проанализировано с использованием алгоритмов компьютерного зрения, которые по видеозаписям с квадрокоптера были способны по ключевым точкам строить 3D-модель окружающего пространства и анализировать перемещение особей внутри этого пространства. При этом использованное ПО не только создавало треки особей, но и было способно по ключевым точкам на теле отслеживать его направление и отдельные движения. Данное ПО было также эффективно в отслеживании перемещений наземных приматов гелада (*Theropithecus gelada* (Rüppell 1835)) (Koger et al., 2023).

Таким образом, на сегодняшний день существует множество успешных разработок в области автоматизации различных элементов анализа фото- и видеоматериала, полученного с помощью БПЛА. Исследователям, проводящим съёмку с БПЛА, предоставляются широкие возможности для работы с большими объемами данных ценой сравнительно небольших трудовых и временных затрат.

НЕДОСТАТКИ БПЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЛЕКОПИТАЮЩИХ Технические ограничения

БПЛА обладают рядом технических ограничений, которые могут негативно влиять на их применимость в научных исследованиях (Anderson, Gaston, 2013). Один из значительных недостат-

ков – сравнительно небольшая емкость аккумулятора, и, соответственно, ограниченное время работы беспилотника. Например, в исследовании охотничьего поведения динго время работы квадрокоптера составляло всего 27 мин при идеальных погодных условиях, а при низких температурах время работы сокращалось до 20 мин (в некоторых ситуациях окончание поведенческого акта не удавалось зафиксировать) (Pollock et al., 2022). Также прямое сравнение данных, полученных при исследовании саванных слонов (*Loxodonta africana* (Blumenbach 1797)) при помощи БПЛА с фиксированным крылом и при помощи обычного самолета, показало, что полеты на беспилотнике ограничиваются трансектами максимально длиной в 40 км, против трансекта длиной в 1000 км, которые удается облететь на пилотируемом летательном аппарате (Vermeulen et al., 2013). Длительность работы аккумуляторного БПЛА может также снижаться при необходимости использовать дополнительное оборудование, такого как тяжелые камеры, передатчики или микрофоны.

БПЛА, используемые в зоологических исследованиях, нельзя назвать универсальными – внешние условия во многом ограничивают возможности их использования. Так, при сильном и порывистом ветре БПЛА может потерять управление и потерпеть крушение (Weissensteiner et al., 2015). Другие неблагоприятные погодные условия, такие как осадки или просто высокая влажность воздуха, которая приводит к формированию тумана и запотеванию сенсоров, может препятствовать использованию беспилотников. Несмотря на возможность летать над разнообразными ландшафтами, в том числе сложными для перемещения человека и наземных транспортных средств, для взлета и посадки большинству дронов требуется площадка с ровной поверхностью (Anderson, Gaston, 2013).

Несовершенная работа камер и стабилизаторов может отрицательно влиять на качество изображений, получаемых БПЛА. В полете могут возникать сложности со стабилизацией изображения вследствие вибрации, создаваемой работой двигателей и роторов, а само изображение может быть испорчено артефактами, такими как перенасыщенность, виньетирование, хроматические аберрации, неправильная балансировка цветов (Whitehead, Hugenholtz, 2014).

Для съемок поведения некоторых видов млекопитающих БПЛА практически неприменимы. К примеру, считается, что большинство БПЛА не подходит для исследования небольших животных (массой менее 30 кг) – их слишком сложно распознать с высоты, полеты на которой не вызывают беспокойства животных (Hughey et al., 2018). Окружение, в котором обитает тот или иной вид, также может вносить ограничения на использование дронов. Деревья с густыми кронами или мутная вода



Рис. 3. Использование алгоритмов компьютерного зрения для анализа материалов, полученных с БПЛА. *A* – одновременное автоматическое определение и трекинг двух видов копытных с визуализированными ограничительными рамками объектов (bbox) для двух видеокadres с использованием обученных моделей (зебры – синий цвет, импалы – белый цвет). Пример автоматической детекции животных на сложном фоне (*B*) с применением функции оператора Собеля для обнаружения границ и (*B*) их отрисовки на исходное изображение. *G* – Сводная инфографика, демонстрирующая современные возможности использования компьютерного зрения для: распознавания видовой принадлежности млекопитающих их положения в пространстве (фиолетовый цвет), отслеживания их перемещений (розовый цвет), индивидуальной идентификации особей (зеленый цвет), категоризации поз тела (оранжевый цвет), реконструкции местообитаний, в том числе поврежденных (голубой цвет). Иллюстрации находятся под открытой лицензией на повторное использование: *A* – Koger et al., 2023; *B*, *B* – Lee et al., 2021; *G* – Tuia et al., 2022.

делают обнаружение животных практически невыполнимой задачей. Однако в подобных ситуациях (если речь идет о теплокровных животных) следует применять тепловизионные камеры (рис. 2Г). К примеру, при подсчете крупных представителей семейства Кенгуровые (Macropodidae) в лесах Австралии с использованием изображений с тепловизионных камер удалось обнаружить на 30% больше особей, чем без использования специального оборудования (Lethbridge et al., 2019). Разрешающая способность тепловизионных камер может стать значительным ограничением. Поэтому исследователи рекомендуют для идентификации некрупных животных использовать тепловизионные камеры с разрешением как минимум в 1024 × 768 пикселей и отмечают, что даже такие камеры могут оказаться не эффективными в лесах с большим количеством деревьев с густой кроной. В таких лесах по результативности использование любых летательных аппаратов все еще проигрывает наблюдениям с земли (Witczuk et al., 2017).

Важно упомянуть, что существуют ограничения на использование БПЛА, установленные в большинстве стран мира на законодательном уровне. В России такое регулирование производится Воздушным кодексом РФ от 19.03.1997 № 60-ФЗ, который требует обязательной сертификации беспилотников при массе от 30 кг и их учета при массе от 0.5 до 30 кг в соответствии с Постановлением правительства РФ от 25.05.2019 № 658.

Среди ограничений, связанных с техническими характеристиками БПЛА и негативно влияющих на их применимость и качество получаемых данных, можно выделить сравнительно небольшую емкость аккумуляторов, наличие определенных требований к условиям съемки, а также необходимость учитывать характеристики ландшафта, в котором находятся исследуемые животные. При этом многие из этих ограничений можно компенсировать настройкой аппарата, использованием дополнительного оборудования и отчасти опытом оператора.

Влияние БПЛА на млекопитающих

С распространением БПЛА, как перспективного метода исследования млекопитающих, стали появляться сообщения о вызванных приближением беспилотника реакциях избегания и признаках беспокойства у наблюдаемых животных. Обитатели наземно-воздушной среды наиболее часто демонстрируют изменения нормального поведения в ответ на приближение БПЛА. У многих исследованных крупных наземных млекопитающих полет БПЛА вызывает поведенческий ответ, чаще всего реакции бегства или повышение бдительности. Согласно результатам изучения реакции на приближающийся квадрокоптер у семи крупных наземных травоядных — саванных слонов, жирафов (*Giraffa*

camelopardalis L. 1758), голубых гну (*Connochaetes taurinus* (Burchell 1823)), бурчелловых зебр (*Equus quagga* Boddaert 1785), импал (*Aepyceros melampus* (Lichtenstein 1812)), антилоп личи (*Kobus leche* Gray 1850) и топи (*Damaliscus lunatus* (Burchell 1824)), поведенческая реакция у всех видов негативная, преимущественно это бегство (Bennitt et al., 2019). На открытых участках реакция избегания наблюдалась чаще, чем среди деревьев, и авторы исследования связывают это с особенностями реакций на хищника в разной среде: в лесу более выгодной стратегией при приближении хищника-засадчика является замирание, ведь при бегстве неизбежно создается шум и возможно получение травм из-за большого количества препятствий (Bennitt et al., 2019).

Звук, издаваемый БПЛА, по-видимому, является наиболее значимым источником беспокойства млекопитающих. Ночные животные — длинношерстные вомбаты (*Lasiorhinus latifrons* (Owen 1845)) — реагировали бегством на звук беспилотника в ночное время суток, когда увидеть его, вероятнее всего, они не могли (Headland et al., 2021), а крупные африканские травоядные демонстрировали поведенческий ответ на БПЛА раньше, чем аппарат появлялся в их поле зрения (Bennitt et al., 2019). Приближающийся роторный беспилотник по звуку, возможно, напоминает роящихся пчел, которые могут жалить даже крупных млекопитающих, и поэтому отпугивает животных, особенно слонов (King et al., 2017). Для минимизации стресса, который может возникнуть у крупных наземных млекопитающих при приближении БПЛА, рекомендуется в полете соблюдать высоту более 60 м и расстояние в горизонтальной плоскости более 100 м (Bennitt et al., 2019). Сходные рекомендации дают исследователи, оценившие реакцию на полет БПЛА у гигантских кенгуру. Поддержание высоты полета 60 м и более сводил видимое беспокойство животных к минимуму. Полет на высоте 30 м вызывал очень интенсивную реакцию бегства, поэтому такие низкие полеты не должны выполняться в исследованиях наземных млекопитающих (Brunton et al., 2019).

Видовая принадлежность исследуемых млекопитающих может влиять на выраженность реакции при приближении беспилотника. Сравнение уровня беспокойства от БПЛА у крупных африканских травоядных показало, что наименее выраженной реакцией была у импал и антилоп личи, что может быть связано со сравнительно слабым слухом у этих видов (Bennitt et al., 2019). При этом по неизвестным причинам наиболее интенсивную реакцию избегания при приближении дрона проявляли бурчелловы зебры и голубые гну, из-за чего авторы рекомендуют вовсе не использовать дроны для исследования этих видов (Bennitt et al., 2019). Сравнение данных учетов видового разнообразия летающих рукокрылых, проводившихся с

использованием БПЛА и с земли, показало, что в одних и тех же местах с помощью беспилотника регистрировали меньшее число видов. По-видимому, БПЛА распугивал виды, которые были наиболее чувствительны к его шуму, и эти виды не попали в учетные данные (Ednie et al., 2021).

Половозрастная категория, к которой принадлежит животное, также может влиять на интенсивность реакции на БПЛА. Лошади Пржевальского (*Equus ferus przewalskii* (I.S. Polyakov 1881)) обращались в бегство при приближении дрона. Степень выраженности реакции зависела от пола и возраста особи: более бдительными были взрослые особи (в среднем начинали убегать, когда БПЛА был на высоте около 20 м), при этом самцы реагировали на БПЛА, находившийся на большей высоте, что, предположительно, связано с ролью самцов как защитников группы (Lu et al., 2021).

Дополнительным фактором, определяющим выраженность реакции на приближение беспилотника, может являться социальное окружение животных. Так, средняя дистанция вспугивания для одиноких гуанако (*Lama guanicoe* (Müller, 1776)) 154 м, для групп – 344 м. Крупные группы гуанако реагировали на дроны раньше, чем небольшие группы. Предположительно, это может быть связано с более высокими шансами заметить угрозу в больших группах (Schroeder, Panebianco, 2021).

Беспилотники могут вызвать не только очевидные для наблюдателя реакции избегания, но и малозаметные поведенческие эффекты, влияя на время, которое животные затрачивают на питание, социальные взаимодействия, отдых и перемещения. При пролете БПЛА с фиксированным крылом на высоте 120 м одичавшие лошади (*Equus ferus caballus* L. 1758) меньше отдыхали и занимались грумингом и больше времени тратили на питание, перемещения и бдительность. Бизоны (*Bison bison* (L. 1758)) также меньше отдыхали и занимались грумингом и больше времени затрачивали на питание и перемещения при использовании БПЛА для наблюдения за ними. При этом реакций избегания животные не проявляли. Таким образом, в некоторых случаях БПЛА может восприниматься как источник относительно небольшого риска, которого недостаточно, чтобы убегать, но который приводит к изменению поведения и, возможно, позволяет справиться со стрессом (Lenzi et al., 2022).

Кроме изменений в поведении, приближение БПЛА может также вызывать физиологические реакции, связанные со стрессом. Такие реакции, особенно продолжительные и/или регулярные, могут снижать общую приспособленность особи, при этом исследователь может не догадываться о причиняемом животным ущербе. Стрессорный физиологический ответ – повышение частоты сердечных сокращений – был зарегистрирован у черных медведей при приближении квадрокоптера; при этом

видимый поведенческий ответ проявлялся нечасто (Ditmer et al., 2015). Интересно, что сходная реакция была показана не только у млекопитающих: королевские пингвины (*Aptenodytes patagonicus* J.F. Miller 1778) при приближении беспилотника также демонстрировали значимое повышение частоты сердечных сокращений, не сопровождавшееся изменениями в поведении (Weimerskirch et al., 2018). Таким образом, даже не вызывая видимых реакций избегания, БПЛА может являться источником стресса для животных.

Влияние беспилотников на млекопитающих может варьировать в зависимости от того, находятся ли животные на суше или в водной среде. На суше млекопитающие могут в большей степени изменять нормальное поведение при приближении (Schroeder et al., 2020; Pomeroy et al., 2015; Smith et al., 2016). Это связано с тем, что визуальные и акустические сигналы от дронов в меньшей степени проникают в водную среду. В прибрежной зоне звуки роторных БПЛА не превосходят по громкости звуки окружающей среды, а в других местах эти звуки едва слышны при высоте полета в 5–10 м над поверхностью воды и только животным, которые находятся на глубине примерно 1 м. Среди морских млекопитающих усатые киты (Mysticeti) и морские слоны (*Mirounga angustirostris* (Gill 1866)) реагировали на звук квадрокоптера только при низком уровне окружающего шума (Christiansen et al., 2016). Афалины (*Tursiops* sp.) демонстрировали изменения в поведении (повышение частоты определенных поведенческих актов, особенно уходов на глубину) как реакцию на снижающийся коптер, так как плавали достаточно близко к поверхности воды, где могли его услышать (Giles et al., 2021). Белухи (*Delphinapterus leucas* (Pallas 1776)) эстуария р. Святого Лаврентия демонстрировали реакции избегания или повышенное беспокойство только при пролетах БПЛА на высоте ниже 23 м (Aubin et al., 2023). Среди представителей другого отряда млекопитающих – Сирен (Sirenia) – дюгоны (*Dugong dugon* (Muller 1776)) не демонстрировали выраженных реакций на БПЛА самолетного типа с двигателем внутреннего сгорания, издающим шум, близкий к шуму роторного БПЛА (Hodgson et al., 2013), тогда как американские ламантины (*Trichechus manatus* L. 1758), содержащиеся в неволе, демонстрировали ярко выраженную реакцию на БПЛА (Landeo-Yauri et al., 2021).

Согласно результатам исследования полуводных млекопитающих, например каланов (*Enhydra lutris* (L. 1758)) и некоторых видов ластоногих (Pinnipedia), приближение БПЛА оказывало наибольший негативный эффект, когда животные находились вне воды, где шум от БПЛА был слышен сильнее (Pomeroy et al., 2015; Smith et al., 2016). Например, ладожские кольчатые нерпы (*Pusa hispida ladogensis* (Nordquist 1899)) уходят с залежек в воду

уже при приближении роторного БПЛА, даже при соблюдении пилотом сравнительно большой высоты полета в 150 м (Медведев и др., 2017).

Таким образом, накопленный на сегодняшний день значительный объем фактического материала демонстрирует, что использование БПЛА вблизи млекопитающих в той или иной степени оказывает негативное влияние на большинство видов. При этом на суше такое воздействие наиболее велико. Важно учитывать, что беспокойство млекопитающих в ответ на приближение беспилотника может быть малозаметно для наблюдателя и обуславливает только изменение физиологических показателей животных.

Предложения по минимизации негативного воздействия БПЛА

Рассмотренные выше примеры негативного влияния на млекопитающих указывают на необходимость взвешенного и ограниченного применения дронов как исследователями, так и кинооператорами, фотографами и туристами. На основании накопленного на сегодняшний день опыта проведения исследований млекопитающих с помощью БПЛА можно сформулировать основные принципы, руководствуясь которыми исследователи могут сводить негативные стороны применения БПЛА к минимуму. Разрабатываемые этические нормы использования БПЛА для съемок диких животных включают в себя рекомендации исключить беспокойство и активное преследование животных (Федорова, 2021).

С учётом литературных данных о влиянии БПЛА на млекопитающих стоит проводить съемку на максимально возможном расстоянии от животных. Оптимальной стратегией является проведение тестовых полетов до начала собственно сбора материала с помощью БПЛА. Тестовые полеты позволяют определить порог высоты полета, на котором БПЛА остается незамеченным животными либо вызывает лишь минимальные тревожные реакции (Saitoh, Kobayashi, 2021). Стоит отметить, что имеющиеся литературные данные о дистанции испугивания особей определенной популяции беспилотником могут быть неприменимы к другим популяциям этого же вида, так как реакция животных может зависеть от их предыдущего опыта. Например, животные, постоянно обитающие вблизи человека, могут быть более привычны к антропогенным источникам шума, в то время как реакция особей из другой популяции, обитающей в удаленных от человека местах, может быть гораздо более выраженной. При этом даже небольшая реакция не означает отсутствие физиологического стресса (Ditmer et al., 2015). Предсказать влияние этого процесса на выживаемость отдельной особи и изучаемой группы практически невозможно, но стоит учитывать возможность возникновения подобного

эффекта и осуществлять непосредственное вмешательство в ход жизни животного следует только в случае отсутствия других возможных способов изучения того или иного феномена (Ditmer et al., 2015; Weimerskirch et al., 2018). Помочь избежать выраженного эффекта на поведение животных может использование БПЛА с низким уровнем шума или без него (аэростаты). Для минимизации негативного воздействия на животных следует, например, произвести расчет минимально необходимых величин: длительности съемки, числа снимаемых особей, частоты полетов в одной и той же местности и т.д. Еще одной важной рекомендацией является подбор оптимального времени суток для съемок. В жаркую погоду полеты логично ограничить утренними, вечерними или ночными часами, когда ниже риск перегрева животных (как непосредственно объектов исследования, так и побочно беспокоенных в ходе работы) в случае проявления реакции активного избегания БПЛА. Кроме того, при планировании работы необходимо учитывать видовые особенности животного и среду, в которой оно находится (Bennitt et al., 2019; Pomeroy et al., 2015; Smith et al., 2016).

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БПЛА В ИССЛЕДОВАНИЯХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В РОССИИ

Как и в других странах, в России особенно широкое распространение использование БПЛА получило в исследованиях морских млекопитающих. Этот метод при сравнительно небольших финансовых затратах позволяет обследовать обширные территории/акватории, регистрировать животных в труднодоступных местах, получать оптимальный ракурс для наблюдений, что особенно актуально при работе с морскими млекопитающими.

Среди ластоногих с помощью квадрокоптера были проведены учеты численности тихоокеанских моржей (*Odobenus rosmarus divergens* Illiger 1811) на мысе Ванкарем, где наземные наблюдения затруднены отсутствием точек с хорошим обзором. Экспериментальным путем была выявлена минимальная допустимая высота (60–70 м), с которой можно проводить съемки моржей БПЛА, не беспокоя их (Скоробогатов и др., 2020). Похожая проблема труднодоступности для исследования мест выхода на сушу тихоокеанских моржей существовала в бухте Кенискин (Чукотка), где использование беспилотников позволило успешно провести учет численности и оценку пространственного распределения моржей (Алтухов и др., 2020). Также успешен проведен подсчет численности сивучей (*Eumetopias jubatus* (Schreber 1776)) на о-ве Медный. При этом БПЛА выигрывают в количестве и качестве собранного материала по сравнению с более трудозатратными традиционными методами. Сивучи не

проявляли видимой реакции на пролеты квадрокоптера на высоте 20–30 м (Ласкина и др., 2020). Другой пример исследования ластоногих с помощью БПЛА — обследование лежбищ байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gmelin 1788) на берегу оз. Байкал (ООПТ “Заповедное Подлесье”). Помимо учетов численности нерпы, авторы определили дистанцию вспугивания при приближении дрона. Животные демонстрировали беспокойство при снижении в среднем на 11 м, но эта дистанция увеличивалась, если нерпы лежали группой (Иванов и др., 2022).

Исследования китообразных (Cetacea) также всё чаще предусматривают использование БПЛА. При проведении учетов численности и наблюдений за поведением беломорской и анадырской популяций белухи были использованы четыре типа беспилотников (Беликов и др., 2018). С помощью БПЛА с фиксированным крылом была проведена оценка численности особей на репродуктивном скоплении у о-ва Большой Соловецкий. При этом результаты этого учета согласовались с данными традиционных береговых наблюдений. Кроме того, были установлены новые закономерности использования территории белухами. Например, было определено смещение предпочтительного места агрегации особей к южной части территории скопления. Также была получена новая информация о времени посещения белухами исследуемой акватории относительно приливно-отливной динамики. Береговые наблюдения ранее позволяли отслеживать белух только во время отлива, тогда как съемки с беспилотника позволили установить, что белухи могут находиться в акватории скопления и во время прилива. Роторные БПЛА оказались эффективными для исследования белух, однако отмечается, что они оказывают влияние на поведение белух. Съемки серых китов с БПЛА позволили дополнить имеющиеся каталоги индивидуальных маркеров особей фотографиями спинной стороны тела этих животных (Тюрнева и др., 2019). Помимо материалов для фотоидентификации, с помощью беспилотника были получены данные о поведении китов, которые позволили определить точный возраст начала кормления и перехода детенышей к самостоятельному добыванию пищи, а также описать кормовое поведение взрослых особей. В ходе наблюдений за плотоядными косатками (*Orcinus orca* (L. 1758)) у Командорских о-вов удалось зафиксировать особенности их поведения при охоте на северных морских котиков (*Callorhinus ursinus* (L. 1758)) (Бычков и др., 2021).

Применение БПЛА для изучения териофауны России не ограничивается морскими млекопитающими. Хотя и в меньшей степени, но в исследованиях наземных млекопитающих этот метод также приобретает популярность. Например, предложена методика проведения учетов охотничьих животных с использованием БПЛА, где отмечена

эффективность такого способа учетов вследствие экономии времени и ресурсов. Для таких работ рекомендовано комбинировать съемку в видимом и ИК-спектре для получения объективных данных о численном и половозрастном составе групп особей (Греков, 2018). Учет лосей (*Alces alces* (L. 1758)) в Ярославской обл. показал высокую эффективность учета с помощью БПЛА, однако авторы отмечают трудоемкость обработки большого числа снимков в случае, когда учетная территория велика (Моргунов и др., 2019). Комбинированная съемка в видимом и ИК-спектре использовалась на регистрации присутствия зубров (*Bison bonasus* (L. 1758)) на отдельных участках национального парка “Орловское поле” в ночное время. Авторы отмечают применимость подобного метода исследования наравне с обычными наблюдениями (Пригоряну и др., 2021). БПЛА показал свою эффективность в изучении родовых берлог белого медведя на о-ве Врангеля, так как позволял с большого расстояния при минимальном беспокойстве самки с детенышами довольно точно оценивать расположение берлог, детально их описывать и характеризовать семейную группу, занимающую эту берлогу, избегая при этом риска для наблюдателей (Васильев и др., 2021). БПЛА были эффективны и в сборе косвенных признаков присутствия животных (тропы, лежки и др.) на территориях ООПТ (Медведев и др., 2015; Пригоряну и др., 2021). У джейрана (*Gazella subgutturosa* (Güldenstädt 1780)) съемка с роторного БПЛА позволила исследовать особенности группового поведения животных при избегании опасности (Березина, 2021).

Таким образом, в России опыт применения БПЛА в биологических исследованиях еще несколько отстает по масштабам от зарубежного, однако все большее число исследователей используют беспилотники в научной работе. Успешный опыт таких исследований демонстрирует, что беспилотники позволяют оптимизировать проведение учетов численности, исследовать ранее недоступные популяции и территории обитания, регистрировать неизвестные характеристики поведения. Россия имеет огромный еще нереализованный потенциал в использовании БПЛА для изучения млекопитающих. Например, беспилотники могут стать эффективным способом облегчить процесс работы исследователя в сложных условиях длительных зим Сибири с экстремально низкими температурами, позволяя в таких условиях проводить мониторинг разреженных популяций таких крупных теплокровных животных, как лоси, сибирские косули (*Capreolus pygargus* (Pallas 1771)) и волки (Prosekov et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты рассмотренных в обзоре научных работ, материал для которых был собран с помощью

БПЛА, демонстрируют применимость и эффективность беспилотников в исследованиях, объектами которых являются млекопитающие. Многообразие БПЛА и вариантов их использования позволяет выполнять широкий диапазон исследовательских задач в различных условиях. Популярность этой технологии среди исследователей связана с целым рядом преимуществ, которыми она обладает в сравнении с другими методами сбора материала. Доступность и возможность самостоятельно модифицировать и использовать БПЛА делает аэросъемку гораздо доступнее для исследователей. Высокое качество получаемых изображений обеспечивает высокую точность и информативность получаемых данных, которые зачастую превосходят таковые при применении более традиционных методов. Немаловажными преимуществами БПЛА по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами являются небольшие размеры, низкий уровень производимого шума и безопасность для исследователя. Перспективным направлением, связанным с широким распространением использованием БПЛА в научных исследованиях, является применение автоматизированных способов обработки и анализа изображений. Развитие компьютерного зрения и алгоритмов глубокого обучения предоставляют возможности для эффективной работы с большими объемами фото- и видеоматериала. Применение беспилотников ограничено сравнительно небольшой продолжительностью непрерывной работы и требовательностью к внешним условиям для полета, влиянием на поведение животных. Значимым ограничением при применении БПЛА является их воздействие на животных. Многие виды млекопитающих проявляют беспокойство и выраженное избегание при приближении дрона. Подлет БПЛА может влиять на млекопитающих и менее очевидным образом, например изменяя бюджет времени, затрачиваемого на различные виды активности, или вызывая физиологические реакции стресса. Исследователям необходимо минимизировать длительность и интенсивность воздействия, в особенности шум от работы БПЛА, а также учитывать видовые особенности животных и их окружение. Перед началом работы следует определять оптимальную высоту полета, на которой реакция животных отсутствует или минимальна. Опыт применения БПЛА для исследований млекопитающих в России достаточно разнообразен и отражает общемировые тенденции ко все большему внедрению данной технологии в зоологические исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда (№ 23-24-00049).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных, соответствующих критериям Директивы 2010/63/EU.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтухов А.В., Козлов М.С., Кочнев А.А., Крюкова Н.В., Скурихин Л.Э., Чакилев М.В., Бурканов В.Н., 2020. Оценка численности моржа (*Odobenus rosmarus*) методом аэрофотосъемки с квадрокоптера Фантом 4 ПРО в бухте Кенискин, Чукотка, в 2017 г. // Морские млекопитающие Голарктики: сборник научных трудов по материалам X международной конференции. Т. 2. С. 42–47.
- Беликов Р.А., Прасолова Е.А., Краснова В.В., 2018. Опыт применения дистанционно пилотируемых и привязных беспилотных летательных аппаратов для исследования беломорской и анадырской белухи. // Морские млекопитающие Голарктики: сборник научных трудов по материалам IX международной конференции. Т. 1. С. 50–58.
- Березина Е.А., 2021. Сенсорная латерализация в поведении сайгака (*Saiga tatarica*) и джейрана (*Gazella subgutturosa*) в природе // ВКР по направлению подготовки "Биология" основная образовательная программа магистратуры "Биологии", Санкт-Петербург, 69 с.
- Бычков А.Т., Миронова А.М., Долганов К.В., Анисимова Т.В., Фомин С.В., Белонович О.А., 2021. Наблюдения плотоядных косаток *Orcinus orca* в акватории лежбищ северного морского котика о-ва Беринга (Командорские острова) в 2020–2021 гг. // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. С. 176–179.
- Васильев Д.В., Бабий У.В., Кулемеев П.С., Груздев А.Р., 2021. Результаты учета берлог белого медведя на острове Врангеля в 2020–2021 гг. // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича. № 29. С. 172–183.
- Иванов К.М., Купчинский А.Б., Овдин М.Е., Петров Е.А., Сыроватский А.А., Шабанов Д.Е., 2022. Опыт применения БПЛА в экологических исследованиях популяции байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gm.) в период начала формирования береговых лежбищ // Международный научно-исследовательский журнал. Т. 8. № 122. С. 1–12.
- Костин А.С., 2019. Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения // Системный анализ и логистика: журнал. Т. 1. № 19. С. 70–80.

- Ласкина Н.Б., Гаев Д.Н., Бурканов В.Н., 2020. Опыт применения квадрокоптера для учета численности сивуча (*Eumetopias jubatus*) на Юго-Восточном лежбище острова Медный // Морские млекопитающие Голарктики: сборник научных трудов по материалам X международной конференции. Т. 2. С. 103–110.
- Медведев А.А., Алексеенко Н.А., Карпенко И.О., 2015. Мониторинг животного мира на особо охраняемых природных территориях с помощью беспилотных летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 6. № 1. С. 304–309.
- Медведев Н.В., Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Сипуля Т., 2017. Особенности поведения ладожской нерпы во время ее учетов с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) // Биоразнообразие экосистем крайнего севера: инвентаризация, мониторинг, охрана: III Всероссийская научная конференция: тезисы докладов. С. 238–240.
- Моргунов Н.А., Ломанова Н.В., Масленников А.В., Шеду В.В., 2019. Результаты авиаучета лося в ФГБУ ГООХ “Медведица” и в Рыбинском районе Ярославской области в 2017 г. с применением беспилотных летательных аппаратов // Вестник ТвГУ. Серия “Биология и Экология”. Т. 3. № 55. С. 69–78.
- Пригоряну О.М., Абадонова М., Карпачев А.П., 2021. Опыт использования БПЛА с тепловизором в мониторинге вольноживущей популяции зубра на примере национального парка “Орловское полесье” // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П. Г. Смидовича. Т. 28.
- Скоробогатов Д.О., Загребельный В., Бурканов, В.Н., 2020. Первый опыт применения квадрокоптера Фантом 4 ПРО для оценки численности тихоокеанского моржа (*Odobenus rosmarus*) на лежбище мыс Ванкарем, Чукотка, в 2017 г. // Морские млекопитающие Голарктики: сборник научных трудов по материалам X международной конференции. Т. 2. С. 131–136.
- Тюрнева О.Ю., Ван Дер Вольф П., Яковлев Ю.М., 2019. Использование беспилотных летательных аппаратов: дополнительные возможности для лабораторной фотоидентификации серых китов (*Eschrichtius robustus*) // Морские млекопитающие Голарктики: сборник научных трудов по материалам X международной конференции. Т. 1. С. 343–353.
- Федорова Л.Н., 2021. Этические аспекты применения беспилотных летательных аппаратов при фото-, видеофиксации диких животных и птиц // Современные проблемы охотоведения: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию учебно-опытного охотничьего хозяйства “Голоустное” имени О.В. Жарова в рамках X международной научно-практической конференции “Климат, экология, сельское хозяйство Евразии”. С. 168–172.
- Al-Thani N., Albuainain A., Alnaimi F., Zorba, N., 2020. Drones for Sheep Livestock Monitoring // 20th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 2020 – Proceedings. P. 672–676.
- Adams K.R., Gibbs L., Knott N.A., Broad A., Hing M., Taylor M.D., Davis A.R., 2020. Coexisting with sharks: a novel, socially acceptable and non-lethal shark mitigation approach // Scientific Reports. V. 10. № 1. P. 1–12.
- Adame K., Pardo M.A., Salvadeo C., Beier E., Elorriaga-Verplancken F.R., 2017. Detectability and categorization of California sea lions using an unmanned aerial vehicle // Marine Mammal Science. V. 33. № 3. P. 913–925.
- Anderson K., Gaston K.J., 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology // Frontiers in Ecology and the Environment. V. 11. № 3. P. 138–146.
- Aubin J.A., Mikus M.A., Michaud R., Mennill D., Vergara V., 2023. Fly with care: belugas show evasive responses to low altitude drone flights // Marine Mammal Science. V. 39. № 3. P. 718–739.
- Azizeh T.R., Sprogis K.R., Soley R., Nielsen M.L.K.K., Uhart M.M., Sironi M., Maron C.F., Bejder L., Madsen P.T., Christiansen F., 2021. Acute and chronic behavioral effects of kelp gull micropredation on southern right whale mother-calf pairs off Peninsula Valdes, Argentina // Marine Ecology Progress Series. V. 668. P. 133–148.
- Bennitt E., Bartlam-Brooks H.L.A., Hubel T.Y., Wilson A.M., 2019. Terrestrial mammalian wildlife responses to Unmanned Aerial Systems approaches // Scientific Reports. V. 9. № 1. P. 2142.
- Bernardes R.C., Lima M.A.P., Guedes R.N.C., da Silva C.B., Martins G.F., 2021. Ethoflow: Computer vision and artificial intelligence-based software for automatic behavior analysis // Sensors. V. 21. № 9. P. 3237.
- Brunton E., Bolin J., Leon J., Burnett S., 2019. Fright or Flight? Behavioural responses of kangaroos to drone-based monitoring // Drones. V. 3. № 2. P. 41.
- Chabot D., Stapleton S., Francis C.M., 2019. Measuring the spectral signature of polar bears from a drone to improve their detection from space // Biological Conservation. V. 237. P. 125–132.
- Chrétien L.-P., Theau J., Menard P., 2015. Wildlife multi-species remote sensing using visible and thermal infrared imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. XL-1/W4. P. 241–248.
- Chrétien L.-P., Theau J., Menard P., 2016. Visible and thermal infrared remote sensing for the detection of white-tailed deer using an unmanned aerial system // Wildlife Society Bulletin. V. 40. № 1. P. 181–191.
- Christiansen F., Rojano-Doñate L., Madsen P.T., Bejder L., Harcourt R., 2016. Noise levels of multi-rotor unmanned aerial vehicles with implications for potential

- underwater impacts on marine Mammals // *Frontiers in Marine Science*. V. 3. P. 277.
- Christiansen F., Sironi M., Moore M. J., Di Martino M., Ricciardi M., Warick H.A., Irschick D.J., Gutierrez R., Uhart M.M., 2019. Estimating body mass of free-living whales using aerial photogrammetry and 3D volumetrics // *Methods in Ecology and Evolution*. V. 10. № 12. P. 2034–2044.
- Christie K.S., Gilbert S.L., Brown C.L., Hatfield M., Han-son L., 2016. Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a trans-formative technology // *Frontiers in Ecology and the Environment*. V. 14. № 5. P. 241–251.
- Colefax A.P., Butcher P.A., Kelaher B.P., 2018. The po-tential for unmanned aerial vehicles (UAVs) to con-duct marine fauna surveys in place of manned air-craft // *ICES Journal of Marine Science*. V. 75. № 1. P. 1–8.
- Colefax A.P., Butcher P.A., Pagendam D.E., Kelaher B.P., 2019. Reliability of marine faunal detections in drone-based monitoring // *Ocean Coastal Management*. V. 174. P. 108–115.
- Corcoran E., Winsen M., Sudholz A., Hamilton G., 2021. Automated detection of wildlife using drones: Synthe-sis, opportunities and constraints // *Methods in Eco-logy and Evolution*. V. 12. № 6. P. 1103–1114.
- Costa H., Rogan A., Zadra C., Larsen O., Rikardsen A.H., Waugh C., 2022. Blowing in the wind: using a con-sumer drone for the collection of humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) blow samples during the Arctic polar nights // *Drones*. V. 7. № 1. P. 15.
- Ditmer M.A., Vincent J.B., Werden L.K., Tanner J.C., Las-ke T.G., Iaizzo P.A., Garshelis D.L., Fieberg J.R., 2015. Bears show a physiological but limited behavioral re-sponse to unmanned aerial vehicles // *Current Biolo-gy*. V. 25. № 17. P. 2278–2283.
- Ditmer M.A., Werden L.K., Tanner J.C., Vincent J.B., Cal-lahan P., Iaizzo P.A., Laske T.G., Garshelis D.L., 2019. Bears habituate to the repeated exposure of a novel stimulus, unmanned aircraft systems // *Conservation Physiology*. V. 7. № 1. P. coy067.
- Ednie G., Bird D.M., Elliott K.H., 2021. Fewer bat passes are detected during small, commercial drone flights // *Scientific Reports*. V. 11. № 1. P. 11529.
- Frouin-Mouy H., Tenorio-Halle L., Thode A., Swartz S., Urban J., 2020. Using two drones to simultaneously monitor visual and acoustic behaviour of gray whales (*Eschrichtius robustus*) in Baja California, Mexico // *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. V. 525. P. 151321.
- Fu Y., Kinniry M., Kloepper L.N., 2018. The Chirocopter: A UAV for recording sound and video of bats at alti-tude // *Methods in Ecology and Evolution*. V. 9. № 6. P. 1531–1535.
- Giles A.B., Butcher P.A., Colefax A.P., Pagendam D.E., Mayjor M., Kelaher B.P., 2021. Responses of bot-tlenose dolphins (*Tursiops* spp.) to small drones // *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Eco-systems*. V. 31. № 3. P. 677–684.
- Goldbogen J.A., Cade D.E., Calambokidis J., Fried-laender A.S., Potvin J., Segre P.S., Werth A.J., 2017. How baleen whales feed: the biomechanics of engulf-ment and filtration // *Annual Review of Marine Sci-ence*. V. 9. № 1. P. 367–386.
- Graving J.M., Chae D., Naik H., Li L., Koger B., Costel-loe B.R., Couzin I.D., 2019. Deepposekit, a software toolkit for fast and robust animal pose estimation using deep learning // *ELife*. V. 8. P. e47994.
- Grenzdörffer G.J., 2013. UAS-based automatic bird count of a common gull colony // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial In-formation Sciences*. V. XL-1. № W2. P. 169–174.
- Hardin P., Jensen R., 2011. Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities // *GIScience and Remote Sensing*. V. 48. № 1. P. 99–111.
- Headland T., Ostendorf B., Taggart D., 2021. The beha-vioral responses of a nocturnal burrowing marsupial (*Lasiorhinus latifrons*) to drone flight // *Ecology and Evolution*. V. 11. № 17. P. 12173–12181.
- Hodgson A., Kelly N., Peel D., 2013. Unmanned aerial ve-hicles (UAVs) for surveying marine fauna: a dugong case study // *PLOS ONE*. V. 8. № 11. P. e79556.
- Hodgson J.C., Baylis S.M., Mott R., Herrod A., Clarke R.H., 2016. Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles // *Scientific Reports*. V. 6. № 1. P. 22574.
- Hodgson J.C., Mott R., Baylis S.M., Pham T.T., Wother-spoon S., Kilpatrick A.D., Raja Segaran R., Reid I., Te-rauds A., Koh L.P., 2018. Drones count wildlife more accurately and precisely than humans // *Methods in Ecology and Evolution*. V. 9. № 5. P. 1160–1167.
- Hughey L.F., Hein A.M., Strandburg-Peshkin A., Jen-sen F.H., 2018. Challenges and solutions for studying collective animal behaviour in the wild // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. V. 373. № 1746. P. 20170005.
- Israel M., 2011. A UAV-based roe deer fawn detection sys-tem // *International Archives of the Photogramme-try, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. V. XXXVIII-1/C22. P. 1–5.
- Jagielski P.M., Barnas A.F., Grant Gilchrist H., Richard-son E.S., Love O.P., Semeniuk C.A.D., 2022. The utili-ty of drones for studying polar bear behaviour in the Canadian Arctic: opportunities and recommenda-tions // *Drone Systems and Applications*. V. 10. № 1. P. 97–110.
- Jewell Z.C., Alibhai S., Law P.R., Uiseb K., Lee S., 2020. Monitoring rhinoceroses in Namibia's private custo-dianship properties // *PeerJ*. V. 8. P. e9670.
- Kelaher B.P., Peddemors V.M., Hoade B., Colefax A.P., Butcher P.A., 2020. Comparison of sampling precision for nearshore marine wildlife using unmanned and

- manned aerial surveys // *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. V. 8. № 1. P. 30–43.
- Kellenberger B., Marcos D., Lobry S., Tuia D.*, 2019. Half a percent of labels is enough: Efficient animal detection in UAV imagery using deep CNNs and active learning // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. V. 57. № 12. P. 9524–9533.
- Kellenberger B., Volpi M., Tuia D.*, 2017. Fast animal detection in UAV images using convolutional neural networks // 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). P. 866–869.
- King L.E., Lala F., Nzumu H., Mwambingu E., Douglas-Hamilton I.*, 2017. Beehive fences as a multidimensional conflict-mitigation tool for farmers coexisting with elephants // *Conservation Biology*. V. 31. № 4. P. 743–752.
- King S.L., Connor R.C., Krutzen M., Allen S.J.*, 2021. Cooperation-based concept formation in male bottlenose dolphins // *Nature Communications*. V. 12. P. 2373.
- Koger B., Deshpande A., Kerby J.T., Graving J.M., Costelloe B.R., Couzin I.D.*, 2023. Quantifying the movement, behaviour and environmental context of group-living animals using drones and computer vision // *Journal of Animal Ecology*. V. 92. P. 1357–1371.
- Koski W.R., Allen T., Ireland D., Buck G., Smith P.R., Macreuder A.M., Halick M.A., Rushing C., Sliwa D.J., McDonald T.L.*, 2009. Evaluation of an unmanned airborne system for monitoring marine mammals // *Aquatic Mammals*. V. 35. № 3. P. 347–357.
- Landeo-Yauri S.S., Castelblanco-Martinez D.N., Henaut Y., Arreola M.R., Ramos E.A.*, 2021. Behavioural and physiological responses of captive Antillean manatees to small aerial drones // *Wildlife Research*. V. 49. № 1. P. 24–33.
- Larsen H.L., Møller-Lassen K., Enevoldsen E.M.E., Madsen S.B., Obsen M.T., Povlsen P. et al.*, 2023. Drone with mounted thermal infrared cameras for monitoring terrestrial mammals // *Drones*. V. 7. № 11. P. 680.
- Lee S., Song Y., Kil S.H.*, 2021. Feasibility analyses of real-time detection of wildlife using UAV-derived thermal and RGB images // *Remote Sensing*. V. 13. № 11. P. 2169.
- Lenzi J., Felege C.J., Newman R., McCann B., Ellis-Felege S.N.*, 2022. Feral horses and bison at Theodore Roosevelt National Park (North Dakota, United States) exhibit shifts in behaviors during drone flights // *Drones*. V. 6. № 6. P. 136.
- Lethbridge M., Stead M., Wells C.*, 2019. Estimating kangaroo density by aerial survey: a comparison of thermal cameras with human observers // *Wildlife Research*. V. 46. № 8. P. 639–648.
- Lhoest S., Linchant J., Quevauvillers S., Vermeulen C., Lejeune P.*, 2015. How many hippos (HOMHIP): algorithm for automatic counts of animals with infra-red thermal imagery from UAV // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. V. XL-3. № W3. P. 355–362.
- Linchant J., Lisein J., Semeki J., Lejeune P., Vermeulen C.*, 2015. Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges // *Mammal Review*. P. 45. № 4. P. 239–252.
- López J. J., Mulero-Pázmány M.*, 2019. Drones for conservation in protected areas: present and future // *Drones*. V. 3. № 1. P. 10.
- Lu V., Xu F., Turghan M.A.*, 2021. Przewalski's Horses (*Equus ferus przewalskii*) responses to unmanned aerial vehicles flights under semireserve conditions: conservation implication // *International Journal of Zoology*. V. 2021. P. 6687505.
- Maeda T., Ochi S., Ringhofer M., Sosa S., Sueur C., Hirata S., Yamamoto S.*, 2021. Aerial drone observations identified a multilevel society in feral horses // *Scientific Reports*. V. 11. № 1. P. 71.
- McCarthy E.D., Martin J.M., Boer M.M., Welbergen J.A.*, 2021. Drone-based thermal remote sensing provides an effective new tool for monitoring the abundance of roosting fruit bats // *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. V. 7. № 3. P. 461–474.
- McEvoy J.F., Hall G.P., McDonald P.G.*, 2016. Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowl surveys: disturbance effects and species recognition // *PeerJ*. V. 4. P. e1831.
- McIntosh R.R., Holmberg R., Dann P.*, 2018. Looking without landing — using remote piloted aircraft to monitor fur seal populations without disturbance // *Frontiers in Marine Science*. V. 5. P. 202.
- Mesquita G.P., Rodriguez-Teijeiro J.D., De Oliveira R.R., Mulero-Pazmany M.*, 2021. Steps to build a DIY low-cost fixed-wing drone for biodiversity conservation // *PLOS ONE*. V. 16. №8. P. e0255559.
- Mo M., Bonatakis K.*, 2022. An examination of trends in the growing scientific literature on approaching wildlife with drones // *Drone Systems and Applications*. V. 10. № 1. P. 111–139.
- Mufford J.T., Hill D.J., Flood N.J., Church J.S.*, 2019. Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and photogrammetric image analysis to quantify spatial proximity in beef cattle // *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. V. 7. № 3. P. 194–206.
- Mulero-Pázmány M., Barasona J.Á., Acevedo P., Vicente J., Negro J. J.*, 2015. Unmanned Aircraft Systems complement biologging in spatial ecology studies // *Ecology and Evolution*. V. 5. № 21. P. 4808–4818.
- Mulero-Pázmány M., Jenni-Eiermann S., Strebel N., Sattler T., Negro J.J., Tablado Z.*, 2017. Unmanned aircraft systems as a new source of disturbance for wildlife: A systematic review // *PLOS ONE*. V. 12. № 6. P. e0178448.
- Mulero-Pázmány M., Stolper R., Van Essen L.D., Negro J.J., Sassen T.*, 2014. Remotely piloted aircraft

- systems as a rhinoceros anti-poaching tool in Africa // PLOS ONE. V. 9. № 1. P. e83873.
- Niethammer U., James M.R., Rothmund S., Travelletti J., Joswig M., 2012. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results // Engineering Geology. V. 128. P. 2–11.
- Nyamuryekung'e S., Cibils A.F., Estell R.E., Gonzalez A.L., 2016. Use of an Unmanned Aerial Vehicle – Mounted Video Camera to Assess Feeding Behavior of Raramuri Criollo Cow // Rangeland Ecology & Management. V. 69. № 5. P. 386–389.
- Oishi Y., Oguma H., Tamura A., Nakamura R., Matsunaga T., 2018. Animal detection using thermal images and its required observation conditions // Remote Sensing. V. 10. № 7. P. 1050.
- Pirotta V., Smith A., Ostrowski M., Russell D., Jonsen I.D., Grech A., Harcourt R., 2017. An economical custom-built drone for assessing whale health // Frontiers in Marine Science. V. 4. P. 425.
- Pollock T.I., Hunter D.O., Hocking D.P., Evans A.R., Pollock T.I., Hunter D.O., Hocking D.P., Evans A.R., 2022. Eye in the sky: observing wild dingo hunting behaviour using drones // Wildlife Research. V. 50. № 3. P. 212–223.
- Pomeroy P., O' Connor L., Davies P., 2015. Assessing use of and reaction to unmanned aerial systems in gray and harbor seals during breeding and molt in the UK // Journal of Unmanned Vehicle Systems. V. 3. № 3. P. 102–113.
- Prosekov A., Vesnina A., Atuchin V., Kuznetsov A., 2022. Robust algorithms for drone-assisted monitoring of big animals in harsh conditions of Siberian winter forests: Recovery of European elk (*Alces alces*) in Salair Mountain // Animals. V. 12. № 12. P. 1483.
- Rathore A., Isvaran K., Guttal V., 2023. Lekking as collective behavior // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. V. 378. P. 20220066
- Saitoh T., Kobayashi M., 2021. Appropriate drone flight altitude for horse behavioral observation // Drones. V. 5. № 3. P. 71.
- Sasse D.B., 2003. Job-related mortality of wildlife workers in the United States, 1937–2000 // Wildlife Society Bulletin. V. 31. № 4. P. 1015–1020.
- Schad L., Fischer J., 2022. Opportunities and risks in the use of drones for studying animal behavior // Methods in Ecology and Evolution. V. 14. № 8. P. 1864–1872.
- Schofield G., Esteban N., Katselidis K.A., Hays G.C., 2019. Drones for research on sea turtles and other marine vertebrates – A review // Biological Conservation. V. 238. P. 108214.
- Schroeder N.M., Panebianco A., 2021. Sociability strongly affects the behavioural responses of wild guanacos to drones // Scientific Reports. V. 11. P. 20901.
- Schroeder N.M., Panebianco A., Gonzalez Musso R., Carmanchahi P., 2020. An experimental approach to evaluate the potential of drones in terrestrial mammal research: A gregarious ungulate as a study model // Royal Society Open Science. V. 7. № 1. P. 191482.
- Serin S., Chur J.S., 2022. Choosing the right drone for animal research // Proceedings of the Joint 12th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research. V. 2. P. 219.
- Smith C. E., Sykora-Bodie S.T., Bloodworth B., Pack S.M., Spradlin T.R., LeBoeuf N.R., 2016. Assessment of known impacts of unmanned aerial systems (UAS) on marine mammals: data gaps and recommendations for researchers in the United States // Journal of Unmanned Vehicle Systems. V. 4. № 1. P. 31.
- Torres L.G., Nieukirk S.L., Lemos L., Chandler T.E., 2018. Drone up! Quantifying whale behavior from a new perspective improves observational capacity // Frontiers in Marine Science. V. 5. P. 319.
- Tuia D., Kellenberger B., Beery S., Costelloe B.R., Zuffi S., Risse B. et al., 2022. Perspectives in machine learning for wildlife conservation // Nature Communications. V. 13. № 1. P. 792.
- Vermeulen C., Lejeune P., Lisein J., Sawadogo P., Bouche P., 2013. Unmanned aerial survey of elephants // PLOS ONE. V. 8. № 2. P. e54700.
- Wang D., Shao Q., Yue H., 2019. Surveying wild animals from satellites, manned aircraft and unmanned aerial systems (UASs): A review // Remote Sensing. V. 11. № 11. P. 1308.
- Weimerskirch H., Prudor A., Schull Q., 2018. Flights of drones over sub-Antarctic seabirds show species- and status-specific behavioural and physiological responses // Polar Biology. V. 41. № 2. P. 259–266.
- Weissensteiner M.H., Poelstra J.W., Wolf J.B.W., 2015. Low-budget ready-to-fly unmanned aerial vehicles: an effective tool for evaluating the nesting status of canopy-breeding bird species // Journal of Avian Biology. V. 46. № 4. P. 425–430.
- Whitehead K., Hugenholtz C.H., 2014. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges // Journal of Unmanned Vehicle Systems. V. 2. № 3. P. 69–85.
- Witczuk J., Pagacz S., Zmarz A., Cypel M., 2017. Exploring the feasibility of unmanned aerial vehicles and thermal imaging for ungulate surveys in forests – preliminary results // International Journal of Remote Sensing. V. 39. № 15–16. P. 5504–5521.
- Xiang H., Tian L., 2011. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV) // Biosystems Engineering. V. 108. № 2. P. 174–190.

THE USE OF DRONES FOR STUDYING THE BEHAVIOUR OF MAMMALS

E. A. Berezina^{1,*}, A. N. Giljov^{1,}, K. A. Karenina¹**

¹Saint-Petersburg State University Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, 199034 Russian Federation

**e-mail: herionnee@gmail.com*

***e-mail: a.gilev@spbu.ru*

Since the advent and wide use of unmanned aerial vehicles (UAVs), they have been increasingly useful in monitoring the abundance, distribution and behaviour of terrestrial and aquatic animals. At present, this technique is actively applied to mammal research. The diversity and relative availability of drones allows for a variety of research tasks to be achieved. The use of UAVs has its advantages and disadvantages, these being discussed in the present review. The study examines the advantages of using UAVs in comparison to other methods, identifies new research opportunities opened up by drones, and emphasizes the advantages of modern analytical tools. The technical limitations of UAVs and the problem of the negative impact of this technique on mammals are discussed. The need to minimize the disturbance of animals during such research is emphasized. In addition, the work summarizes the experience of using UAVs in the studies on Russia's theriofauna.

Keywords: UAV, monitoring, observation, aerial filming