ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(11-1):51–67
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.064 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_51

ОБЗОР НОВЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ СПОСОБОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В. В. Юрак[1], А. Н. Малышев[1], С. С. Завьялов[1]

[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия, office@ursmu.ru

Аннотация: с развитием информационных технологий человечество всё активнее использует беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для выполнения различных задач, в том числе в сфере природопользования. Текущее исследование посвящено обзору научно-исследовательских работ в сфере применения современных дистанционных методов экологического мониторинга в целях изучения имеющегося опыта на предмет его внедрения в практику Российской Федерации. Данная статья ориентирована на комплексное изучение инноваций и разработок на предмет использования БПЛА в природопользовании за период 2016–2022 гг. Проанализированные информационные источники разделены по критерию исследуемых составляющих геосистем: на абиотические и биотические. В ходе работы были рассмотрены существующие методы применения БПЛА; выявлены основные трудности, связанные с совершенствованием и возможностью применения данных технологий. В отношении абиотических составляющих работы по использованию БПЛА распределены в разрезе следующих направлений: 1) оценка качества атмосферного воздуха «in situ»; 2) инструмент для отбора проб и последующей транспортировки. В отношении биотических: 1) исследование влияний деструктивных факторов по отношению к живым существам; 2) интеграция методов машинного обучения для экологического мониторинга биотических составляющих экосистем.

Ключевые слова: экологический мониторинг, дроны, беспилотно-летательные аппараты, контроль, природопользование, абиотические и биотические комплексы, окружающая среда, дистанционный анализ, экосистемы.

Благодарности: Исследование подготовлено в соответствии с государственным заданием на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075–03–2022–401 от 12.01.2022.

Для цитирования: *Юрак В. В., Малышев А. Н., Завьялов С. С.* Обзор новых дистанционных способов экологического мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11-1. — С. 51–67. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_51.

Review of new remote methods for environmental monitoring

V. V. Yurak[1], A. N. Malyshev[1], S. S. Zavyalov[1]

[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: With the development of information technology, humanity is increasingly using unmanned aerial vehicles (UAVs) to perform various tasks, including in the field of environmental management. The current study is devoted to the review of research works in the field of application of modern remote methods of environmental monitoring in order to study the existing experience for implementation in the practice of the Russian Federation. The work is focused at a comprehensive study of developments in the period 2016–2022. The

© В. В. Юрак, А. Н. Малышев, С. С. Завьялов. 2022

analyzed studies are divided according to the criteria of the studied components of geosystems: on abiotic and biotic. In the course of the work, the existing methods of using UAVs were considered; the main difficulties associated with the improvement and the possibility of using these technologies were identified. With regard to the abiotic components of the work, the use of UAVs is distributed in the following directions: 1) assessment of atmospheric air quality "in situ"; 2) instrument for sampling and subsequent transportation. In relation to biotic: 1) research on the effects of destructive factors in relation to living beings; 2) integration of machine learning methods for environmental monitoring of biotic components of ecosystems.

Key words: environmental monitoring, drones, unmanned aerial vehicles, control, nature management, abiotic and biotic environmental complexes, environment, remote analysis, ecosystems.

Acknowledgements: The research was carried out according to the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 075–03–2022–401).

For citation: Yurak V. V., Malyshev A. N., Zavyalov S. S. Review of new remote methods for environmental monitoring. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-1):51–67. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_51.

Введение

Горнодобывающая и металлургическая промышленность оказывает негативное воздействие на окружающую среду, что влияет на круговорот химических элементов в биосфере. На территории Российской Федерации (РФ) в рамках контроля осуществляется экологический мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. При всем разнообразии существующих методов, реализуемых для охраны окружающей среды, возникает существенная потребность в их корректировке с позиции современного опыта в данной области. Таким образом, требуется особая система экологического мониторинга, при которой можно обеспечить необходимую минимизацию воздействия промышленности на окружающую среду.

Вопросы создания цифровых методов экологического мониторинга, их технического обеспечения рассматриваются в большом количестве работ [1–3]. При этом разработка цифровых методов ведётся на стыке междисциплинарных исследований. Военная сфера стала одной из первых, где проводились исследования в данной области. Еще в 1930-х гг. прошли первые испытания летательных аппаратов, которые управлялись дистанционно. А в 1970–1980 гг. уже были созданы спутниковые системы картографирования земной поверхности с проекцией высокого разрешения. В последующем ученые решили использовать опыт, полученный военными, для реализации альтернативных направлений исследований. Так, в качестве примеров можно привести работы как отечественных, так и зарубежных авторов. В. А. Румянцев и др. [4] рассматривали применение оптико-акустического и оптического комплексов для дистанционного обнаружения экологически загрязненных участков местности. В работе Е. Р. Потапова и др. [5] продемонстрировано использование малых дронов для осмотра гнезд белоплечего орлана. Данные научные наработки в последние десятилетия были внедрены на территории таких стран, как США, Китай, Канада, Великобритания, Германия и др. В этих странах дроны используются как метод альтернативного контроля в рамках экологического мониторинга [3]. Например, на территории Китая в целях борьбы с загрязнением атмосферы органы государственной власти стали использовать дроны, которые отслеживают нелегальные выбросы на карьерах в ночное время [5].

Преимущество дронов заключается в их мобильности, увеличенном ради-

усе действия, что обеспечивает более точное выполнение поставленных задач. В зависимости от цели эти автономные летательные аппараты оснащаются различным рядом датчиков, включая акустические, визуальные, экологические, биологические и др.. Таким образом, цель текущего исследования: провести обзор исследований по использованию БПЛА при экологическом мониторинге для изучения имеющегося опыта на предмет внедрения в российскую практику.

Материалы и методы исследования

Информационную базу исследования составили работы отечественных и зарубежных ученых по тематике исследования. Методологическую базу определяют такие общенаучные методы исследования, как исторический, диалектический, абстрактно-логический, анализа, сравнения и синтеза.

Были изучены порядка 100 работ, из которых впоследствии для более детального изучения было отобрано 50 наиболее значимых. Обзор включает самые актуальные исследования за период 2016-2022 гг.

Результаты

В последние годы стало актуальным использование дронов при решении задач экологического мониторинга. Практически ежегодно публикуются обзоры по данной тематике. За последние 5–6 лет были представлены исследования в таких направлениях, как применение беспилотно-летательных аппаратов в прибрежных зонах местообитаний биотических сообществ, измерение качества атмосферного воздуха, отбор проб воды с помощью дронов, дистанционное зондирование в точном земледелии, химическое зондирование окружающей среды, а также с целью цифрового картирования и оценки качества почв [7–11].

Одним из основных результатов работы зарубежных исследователей стало формирование множества возможных конфигураций датчиков с различными функциональными возможностями в зависимости от места локализации и поставленных задач. Из-за создания большого количества вариаций оснащения БПЛА возникли вопросы, связанные с выбором наиболее подходящих датчиков для проведения точного экологического мониторинга состояния окружающей среды на территории РФ.

Так, анализ изученных работ позволил классифицировать сферы применения БПЛА в целях экологического мониторинга по критерию объекта наблюдения и контроля. Согласно данному критерию БПЛА применяются для:

1. Оценки абиотических составляющих природных и антропогенно-трансформированных экосистем;
2. Оценки биотических компонентов экосистем.

1. Оценка абиотических составляющих природных и антропогенно-трансформированных экосистем

В разрезе оценок абиотических составляющих природных и антропогенно-трансформированных экосистем БПЛА используются в двух направлениях: 1) для непосредственной оценки качества атмосферного воздуха «in situ» с точки зрения измерения концентраций химических веществ, возникающих в результате человеческой деятельности; 2) в качестве инструмента для отбора проб и последующей транспортировки.

Примерами использования в рамках первого направления (то есть для непосредственной оценки качества

атмосферного воздуха «in situ» с точки зрения измерения концентраций химических веществ, возникающих в результате человеческой деятельности) служат исследования [12–21]. Так, в Технологическом университете Квинсленда были проведены исследования по применению БПЛА для определения концентраций CO, CO_2, NO и NO_2 в атмосферном воздухе при помощи авторских газоанализаторов. В процессе исследования было выяснено, что на результаты измерений оказывает влияние место крепления датчиков на БПЛА. Измерения проводились по точечным выбросам. Результаты исследования определили основные принципы разработки системы «газоанализатор — БПЛА». Авторами было установлено, что датчики должны находиться в непосредственной близости к аппарату в целях минимизации воздействия воздушных винтов на результаты измерений. Минимальное воздействие было зафиксировано на датчиках, установленных непосредственно под дроном [12]. Подобные исследования, реализуемые в рамках аэродинамики потоков пропеллеров и размещения датчиков на борту БПЛА, были также представлены в работах [13, 14]. Несмотря на то, что авторы акцентируют внимание, что они являются первыми в данной области, учитывая вышеуказанное, это не совсем верно. Скорее, они входят в число первых, кто решил разобраться с подобной научно-практической задачей.

Если говорить об оценке абиотических составляющих, то интерес может представлять распределение твердых частиц по крупности в атмосферном воздухе. Именно эту задачу решили Yishu Zhu и др. в своей работе [15]. Они разработали и испытали собственный миниатюрный газоанализатор (Hy-SMPS), с помощью которого проводились измерения распределения твердых частиц в вертикальном профиле над Северо-Китайской равниной.

Одно из наиболее интересных и инновационных исследований в сфере экологического мониторинга, реализуемого при помощи дронов, было проведено Godall Rohi и др. [16]. Оно заключалось в проверке гипотезы о том, что дроны могут использоваться как для автономного мониторинга атмосферного воздуха, так и для борьбы с загрязнениями «in situ». В полевом исследовании Godall Rohi и др. [16] дрон при полете собирал данные по 6 показателям: концентрации газов (O_3, NO_2, CO_2, SO_2, CO) и уровень запыленности (PM). При этом специально разработанная программа рассчитывала индекс качества воздуха (Air Quality Health Index (AQHI)), и если AQHI признавался неудовлетворительным, то дрон выбрасывал дозированное количество бортового раствора-нейтрализатора. Для проверки гипотезы в полевых условиях был выбран газ NO_2. Бортовым раствором объемом 500 мл являлась перекись водорода (H_2O_2) и азотная кислота (HNO_3). В результате проведенное исследование подтвердило гипотезу о возможности использования БПЛА для таких целей, как экомониторинг, а также для борьбы с загрязнениями «in situ».

Tie Zheng и др. в своей работе изучали особенности вертикального и горизонтального распределения загрязняющих веществ, при этом источником загрязнения выступали транспортные средства [17]. Объектом исследования являлась городская магистраль. Определяемые показатели в работе: PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10}, общее количество твердых частиц < 15 мкм, CO, температура и влажность, скорость и направление ветра, а также объем трафика. Исследование проводилось на высоте от 0 до 120 м

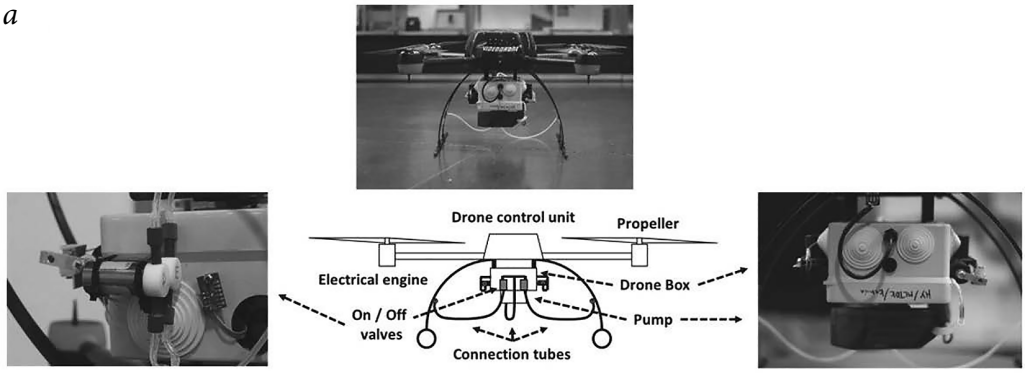
с шагом в 10 м. Длительность нахождения дрона на каждой высоте равнялась 1 мин. Авторы установили, что придорожные концентрации CO и взвешенных твердых частиц (PM) имеют экспоненциальный спад по вертикали. Падение концентраций в основном фиксируется на высоте 0–60 м и 0–40 м соответственно. При этом отмечено, что на концентрацию PM_1 в большей степени влиял фоновый уровень, а не автомобильный трафик. В случае с CO и крупнодисперсными твердыми частицами наоборот — напрямую влияло количество автотранспорта и, как следствие, наибольшая концентрация наблюдалась в часы пик. Авторы зафиксировали и подтвердили, что максимальное количество твердых частиц, оцениваемое в вертикальном профиле, приходится на утренние и вечерние часы пик, что связано с увеличением количества автотранспорта. Также было выявлено, что CO имеет большую область рассеивания, чем твердые частицы: на высоте в 40 м область рассеивания составила 60 м для CO и 30 м для твердых частиц. Стоит отметить, что ограничением результатов подобного рода исследований является их локальность.

Новаторским направлением междисциплинарных исследований на данном этапе можно признать тематику создания роя дронов, в том числе и для целей экомониторинга [18–19]. Однако стоит учитывать, что используемые при этом датчики, несмотря на их крайнюю быстроту определения концентраций различных химических соединений, могут обладать значительной погрешностью по сравнению со стационарными газоанализаторами, что подтверждает исследование [20]. К тому же не стоит упускать из внимания погрешность, связанную с передачей данных. В зависимости от используемых датчиков, а именно от модуля связи, установленного в них, погрешность значительно варьируется. Так в работе [21] подлежали сравнению результаты использования датчиков температуры и давления. Для датчика температуры погрешность при онлайн передаче по сравнению с офлайн составила 6,2%, а у датчика давления, наоборот, сравниваемая погрешность оказалась минимальна и незначительна.

Примерами использования БПЛА в рамках второго направления оценки абиотических составляющих (то есть в качестве инструмента для отбора проб и последующей транспортировки) служат исследования [22–30]. При этом следует отметить некоторое ограничение в использовании БПЛА в качестве пробоотборников. Необходимость в таком подходе возникает лишь при определении низких концентраций исследуемых химических соединений [22].

Исследования в рамках данного направления тесно связаны друг с другом и довольно часто дублируют результаты. Например, проверка нового способа улавливания летучих органических веществ (ЛОС) была представлена в работе Jose Ruiz-Jimenez и др. [23]. В исследовании использован метод твердофазной микроэкстракции (SPME Arrow) и внутритрубной экстракции (ITEX). Внутритрубная экстракция выполнялась с помощью сорбирующего материала, подходящего для отбора проб и обеспечивающего удержание интересующих ЛОС (рис. 1). Анализ выполнен с применением термодесорбции, газовой хроматографии и масс-спектрометрии (ГХ-МС). Важно отметить, что в работе авторы демонстрируют результаты применения обоих методов: и SPME Arrow, и ITEX (то есть двух вариантов пробоотборников соответственно).

а



б

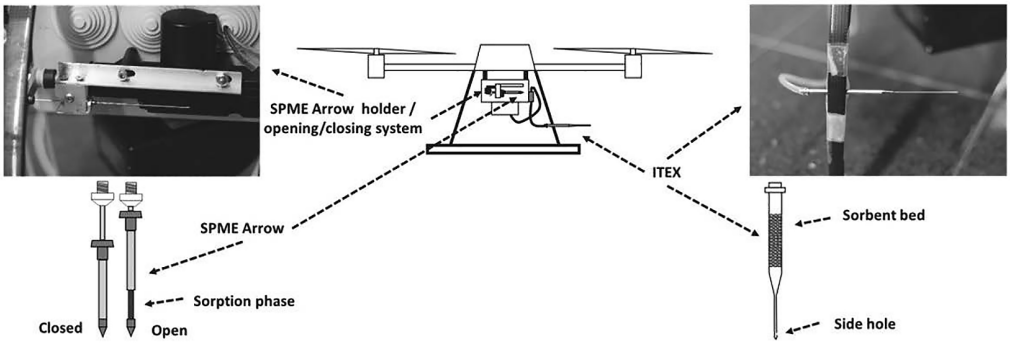


Рис. 1. БПЛА — носитель для новых миниатюрных систем отбора проб воздуха: а — схематический общий и детализированный вид спереди; б — схематический общий и детализированный вид сбоку [23]
Fig. 1. UAV carrier for new miniature air sampling systems: а — schematic general and detailed front view; б — schematic general and detailed side view [23]

При использовании метода внутритрубной экстракции с сорбентом было уловлено большее количество соединений, чем при методе твердофазной микроэкстракции. Отмечена зависимость количества обнаружения соединений от состава и качества покрытия SPME Arrow. Например, Carbon WR, Carbon WR/PDMS и PDMS/DVB позволили собрать от 27 до 31 соединений с широким спектром функциональных групп: от углеводородов до кислородсодержащих соединений, а количество соединений, адсорбированных на лабораторном функционализированном мезопористом силикагеле, было в 2–3 раза меньше по сравнению с коммерческими сорбентами. Кроме того, при использовании твердофазной микроэкстракции серьезная погрешность может возникнуть в условиях горизонтального и вертикального смещения дрона, что не наблюдается у ITEX-пробоотборника. Несмотря на это, авторами выявлена динамика увеличения количества обнаруженных соединений при использовании ITEX с дополнительным оборудованием, например, с ловушками, которые не допускают окисление ЛОС. Разработанная авторами система позволяет проводить недорогие исследования содержания ЛОС вертикального профиля в атмосферном воздухе.

В 2021 году, опираясь на ранее упомянутое исследование, Leslie A. Simms

и др. разработали и провели испытание собственного пробоотборника для оценки концентраций ЛОС в районах возгораний [24]. Главным отличием пробоотборника является механизм использования, который представлял собой применение собственных микрочипов для предварительной концентрации ЛОС (μPC), встроенных в компактный пробоотборник. Чипы μPC изготовлены из боросиликатного стекла и содержат встроенный нагреватель и термостатические элементы RTD (автоматический пропорциональный регулятор с маленьким относительным диапазоном регулирования). Слой сорбента, расположенный в центре чипов, содержит 6,994 ± 0,821 мг сорбента Tenax TA, который специально разработан для улавливания летучих и полулетучих веществ из воздуха. Чипы способны всего за 2 минуты отбирать крайне низкие концентрации, вплоть до 22 ppb (ppb — миллиардные доли). Каждый чип был термически десорбирован и проверен на отсутствие фоновых уровней химических веществ перед каждым отбором проб. По окончании замеров пробоотборник вернули в лабораторию для химического анализа проб. Как в работе Jose Ruiz-Jimenez и др., была использована ГХ-МС. Разработанный пробоотборник показал себя успешно.

Также не обошлось без оценки микроскопических концентраций твердых частиц в атмосферном воздухе. Интерес представляет работа [25], в которой авторы решили улучшить заборные возможности стандартного пробоотборника за счет расположения воздухозаборных отверстий со всех сторон. Воздух поступает как с вертикального, так и с горизонтального профилей. Это действительно увеличивает достоверность забираемых частиц, о чем также свидетельствует коэффициент корреляции Пирсона: 0,98 для CO_2 и 0,99 для твердых частиц. Можно сделать вывод, что важно учитывать концентрации во всех профилях.

Black O. и др. [26] проводили исследования использования БПЛА при анализе газообразных форм ртути в воздухе. Для этого использовались ловушки для ртути: стеклянные картриджи с золотым напылением в количестве трёх единиц. Выбор такого покрытия основан на том, что именно данный металл эффективно улавливает все газообразные формы ртути. Помимо этого, авторы закрепили трубки, установленные под квадрокоптер, на специальном держателе. После забора атмосферного воздуха анализ ловушек проводился с применением атомно-флуоресцентной спектрометрии холодного пара. По результатам анализа получилось, что пробы нескольких точек имели концентрации Hg > 5 мг/м^3. Исследование демонстрирует, что дроны могут использоваться для измерения концентрации ртути на высоте, что может быть особенно полезно для оценки выбросов ртути на отдаленных территориях и временных источниках выбросов, которые вносят вклад в дисбаланс экосистем.

Y.-C. Chen и др. [27] в своем исследовании разработали пробоотборник для аэрозольных загрязнителей (Cl^-, NO_2^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, Na^+, NH_4^+, K^+, Mg^{2+} и Ca^{2+}) и установили его на БПЛА, а также применили ионную хроматографию для анализа проб. Пробоотборник ACME (рис. 2) включал:

– денудер (MPPDD). Он содержит два набора из восьми кварцевых параллельных пластин и имеет эффективность удаления мешающих кислых и основных газов до 98%. Каждая пластина разделена пластиной толщиной 3 мм. Первый набор покрыт 1% карбонатом натрия, а второй набор 2%

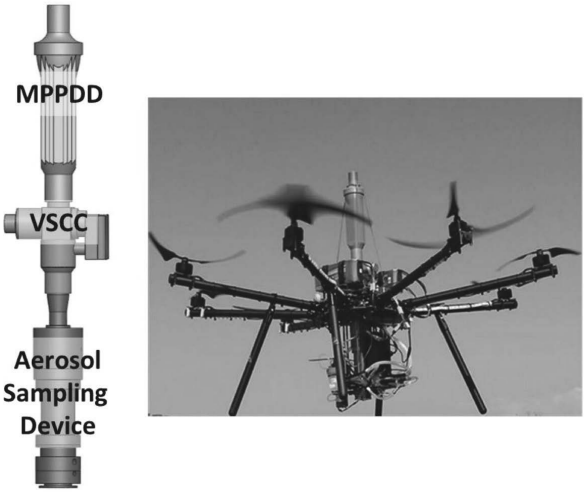
лимонной кислотой для удаления кислых и основных газов соответственно;

– циклон, примененный для удаления аэрозолей диаметром больше 2,5 мкм. (VSCC);

– устройство отбора проб (Aerosol Sampling Device), куда попадали аэрозоли, которые остались после разделения. При измерениях зафиксировано уменьшение общих концентраций ионов примерно от 54 до 26% с увеличением высоты над землей, это может быть связано с влиянием выбросов транспортных средств и деятельностью человека. В целом пробоотборник можно использовать при вертикальном анализе профиля распределения аэрозольных загрязнителей.

Truls Andersen и др. объединили гибкость и мобильность БПЛА, а также способность AirCore захватывать и сохранять образцы атмосферного воздуха в целях проектирования и разработки альтернативной версии AirCore, которая получила название «active AirCore» [28]. AirCore — простая система для отбора проб воздуха, описанная в 2010 году в исследовании Anna Karion и др. [29]. Пробоотборник же Truls Andersen и др. состоит из ~ 50 м тонкостенной трубы из нержавеющей стали, осушителя, микронасоса и регистратора данных (рис. 3). Он помещен в ящик из углеродного волокна и прикреплен к БПЛА. После забора воздуха микронасос выключали и запорный клапан закрывал впускное отверстие. Для анализа образцов использовали анализатор концентрации газа Picarro CRDS G2401 (улавливает до миллиона ppm). После приземления БПЛА трубка подключалась к анализатору, происходил выпуск собранного образца и его последующий анализ. Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность разработанной системы.

В последующем 2021 году проводилось повторное испытание устройства для количественной оценки метана, поступающего из вентиляционных систем угольных шахт [30]. В нем авторы дополнительно перед запуском БПЛА применили радиозонды

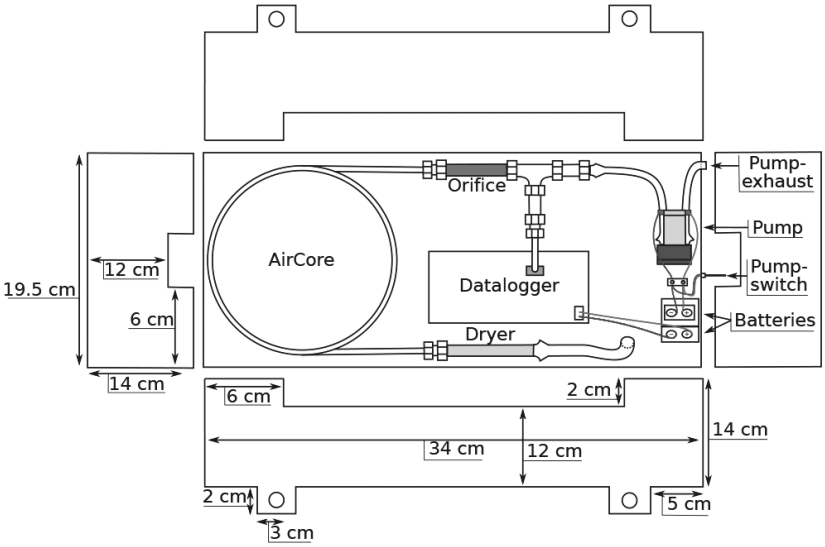


а *б*

Рис. 2. а — оборудование, разработанное для отбора проб воздуха; б — дрон, на котором пробоотборник установлен [27]

Fig. 2. a — equipment designed for air sampling; б — drone on which the sampler is installed [27]

а



б

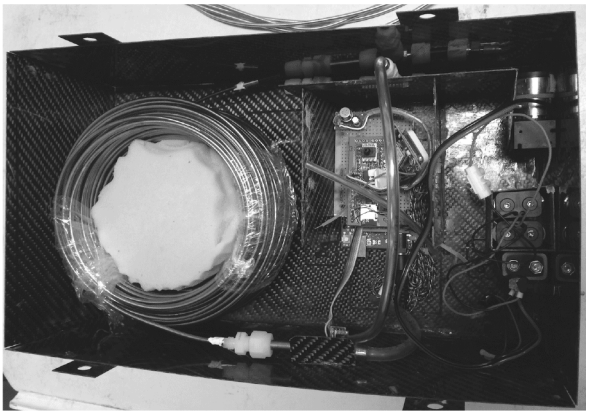


Рис. 3. Пробоотборник «active AirCore»: а — схема авторского пробоотборника; *б —* реальное фото устройства [29]
Fig. 3. Sampler "active AirCore": а — scheme of the author's sampler; *б —* real photo of the device [29]

для анализа температуры окружающей среды, давления, относительной влажности, скорости и направления ветра. Было использовано обратное гауссово распределение в сравнении с методом, основанном на массовом балансе. В результате пришли к выводу, что обратное гауссово распределение рекомендуется использовать при оценке выбросов из точечных источников.

2. Оценка биотических составляющих природных и антропогенно-трансформированных экосистем

Как уже было отмечено, вторым важным объектом оценки по крите-

рию наблюдения и контроля являются биотические компоненты анализируемых экосистем. Вопросы охраны биологического разнообразия как одного из факторов устойчивого развития биосферы стали ключевой проблемой современной экологии [31, 32]. В рамках данной тематики создаются специальные системы по мониторингу биологического разнообразия. Например, для оценки состояния популяций, численности видов, условий их обитаний. Эти системы на данном этапе становятся основным способом наблюдения и последующего прогнозирования развития составляющих элементов биоразнообразия. При мониторинге биоразнообразия фауны с помощью БПЛА чрезвычайно важным является оценка реакции живых существ на БПЛА как раздражитель.

В данном случае мировой опыт по данной тематике дифференцируется на два ключевых направления:

1. Исследование влияния деструктивных факторов, возникающих при применении БПЛА, по отношению к живым существам.

2. Интеграция методов машинного обучения при использовании БПЛА в целях экологического мониторинга биотических составляющих экосистем.

Исследуя работы по первому направлению, необходимо начать со статьи, опубликованной в 2019 году в журнале Biological Conservation под названием «Руководство по охране окружающей среды при эксплуатации дистанционно пилотируемых авиационных систем: опыт Антарктики» [33]. Это обзор, на основании которого было установлено, что дроны могут являться раздражителями для животных, вызывать стресс или причинять вред. Данный факт подтверждается описанием полевых исследований; исследовалось влияние на антарктических пингвинов (Pygoscelis antarcticus) и макаронных пингвинов (Eudyptes Chrysolophus). Сделан вывод о необходимости проведения анализа воздействия дронов для каждого вида в отдельности. Выяснилось, что сообщества реагируют на раздражитель по-разному. Так, в 2021 году было проведено исследование по выявлению реакций взрослых особей императорских пингвинов (Aptenodytes forsteri) и их птенцов как от полета БПЛА, так и от присутствия людей [34]. Квадрокоптер и человек находились в непосредственной близости к взрослым и молодым особям. Уровень шума на земле непосредственно под БПЛА составил 74 дБ. Дрон летел на высоте 5 м над землей со скоростью 15 м/с. Птенцы проявляли повышенную активность к дрону при его вертикальном приближении, в последствии переключая внимание на человека. Взрослые особи изначально следили за человеком. На вертикальный полет аппарата реакция была крайне незначительна как у взрослых, так и у молодых особей. Бдительность и махание ластами послужили индикаторами беспокойства. Исходя из этого, можно сделать вывод, что дроны привлекают внимание молодых особой больше, чем человек.

Из существующих работ можно сделать вывод о том, что на обоснование расстояния дрона от объекта дикой природы могут влиять поведенческие особенности, а также множество индивидуальных характеристик рассматриваемого таксона [34—39]. Например, при оценке влияния на группу африканских слонов (Loxodonta africana), крякв (Anas platyrhynchos), диких фламинго (Phoenicopterus roseus) и больших улитов (Tringa nebularia) параметры окружающей среды, внешний вид аппарата, а также смена параметров полета дрона (переменная и постоянная скорость и высота полета) не влияли на реак-

цию групп особей. На группу кенгуру (Macropus giganteus) влияние оказывала смена параметров полета, что приводится в статье по изучению поведенческой реакции данного вида на шумовое воздействие от дронов [39]. В работе Elisabeth Vas и др. авторы смогли подлететь в 80% случаев из 204 полетов на расстояние в 4 метра к группам особей-птиц. Можно предположить, что это было связано с шумом, издаваемым группами, характеристиками используемого оборудования, осторожностью и аккуратностью оператора, а также следствием адаптирования к шуму у птиц, так как эксперимент проводился на территории зоопарка. Данная особенность прослеживается и у императорских пингвинов (Aptenodytes forsteri), то есть увеличение численности особей вело к уменьшению минимального расстояния полета [34, 36, 39].

Переходя ко второму направлению (интеграция методов машинного обучения при использовании БПЛА в целях экологического мониторинга биотических составляющих экосистем), необходимо отметить популярные используемые подходы. Все чаще наблюдается использование дронов в области контроля за лесным хозяйством и растительностью. Это связано с тем, что постоянное проведение полевых работ — дорогостоящий и сложный в реализации процесс. В свою очередь, существует три наиболее распространенных подхода по дистанционной оценке [40–42]:

1. использование изображения облака точек (drone-based image point clouds / DIPC), полученного с цифровой камеры или лазерного сканера, и последующая обработка;

2. применение зонального подхода, то есть основанного на конкретных областях с использованием статистических данных (area-based approach / ABA);

3. подход по обнаружению отдельных деревьев (individual tree detection / ITD).

Авторы в работе [43] применили подход с обработкой облака точек. На основе переменных высот растительного покрова, индекса растительности, индекса текстур и индекса облака лазерных точек, с помощью дистанционного зондирования на малых высотах, используя БПЛА, они использовали восемь моделей машинного обучения (ML) для оценки надземной биомассы мангровых зарослей в заливе Бейбу (Aegiceras corniculatum и Sonneratia apetala) и сравнили точность различных моделей машинного обучения для этих оценок. Всего было выделено 37 переменных оценок, использовано 8 алгоритмов машинного обучения — XGBR, GBR, RFR, SVR, GPR, DTR, ETR и KNNR — для выделения наиболее эффективного и определения пространственного распределения с использованием данных аэрофотоснимков БПЛА. Большая часть параметров связана с использованием лидара и построением лазерного облака точек. Среди восьми моделей машинного обучения XGBR имела самую высокую точность в оценке биомассы мангровых зарослей (R^2 = 0,8319, RMSE = = 22,7638 Мг/га), за ней следует RFR (R^2 = 0,7887, RMSE = 25,5193 Мг/га). SVR, DTR и ETR имели плохие аппроксимирующие показатели (рис. 4).

Экомониторинг осуществляется для сохранения зеленых зон актуален и в урбанистических условиях. Именно поэтому Xiaofeng Wang и др. провели мониторинг городских лесов с помощью БПЛА [44]. Общая площадь исследуемой территории составила 13 400 м^2. Авторы исследовали спектральную информацию, морфологические параметры растительности, информацию о текстуре и рассчитали

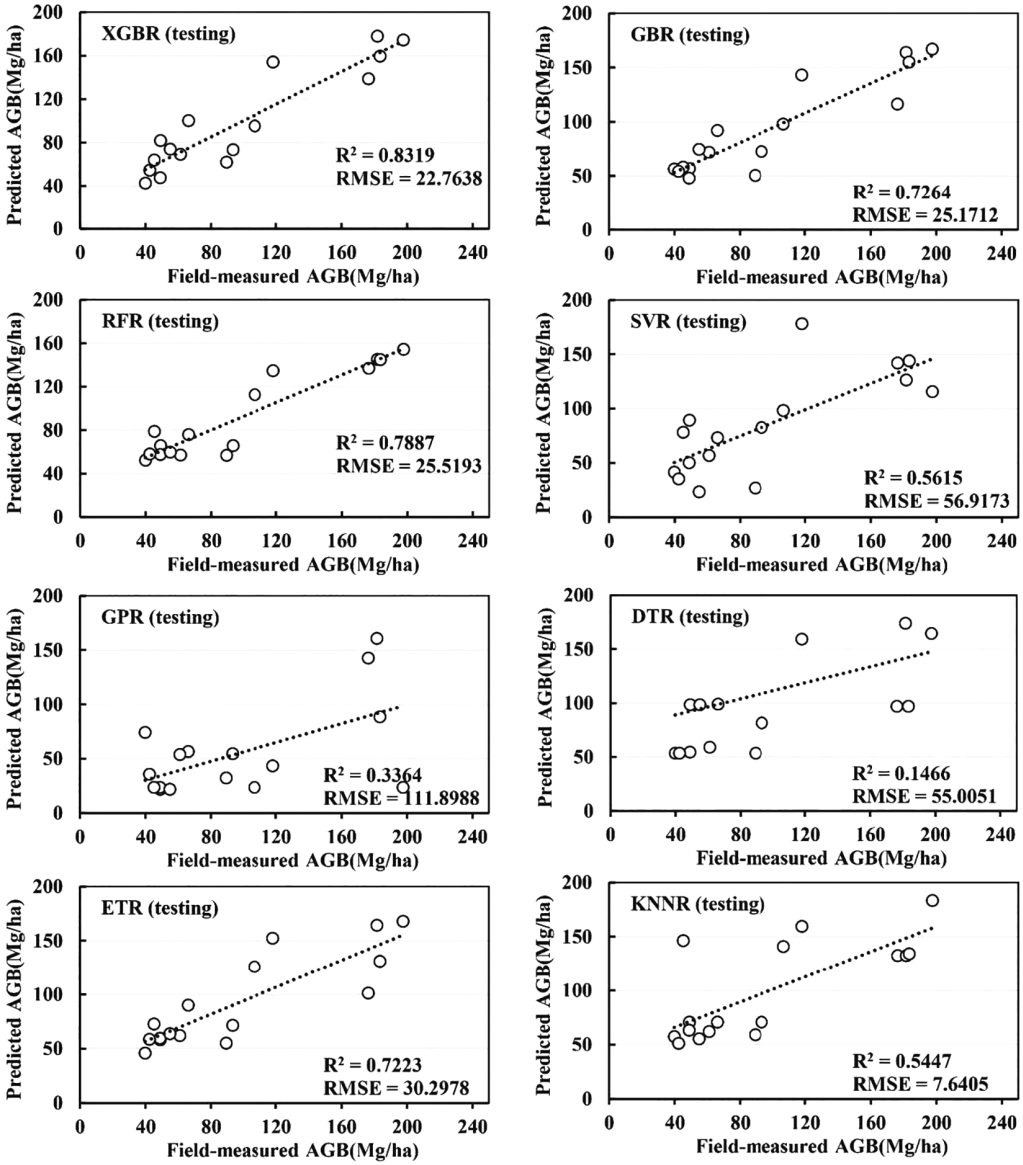


Рис. 4. Сравнение точности оценки биомассы мангровых лесов различными моделями ML [43]
Fig. 4. Comparison of the accuracy of mangrove forest biomass estimates by different ML models [43]

индексы растительности на основе изображений сверхвысокого разрешения БПЛА. Они занимались построением объектно-ориентированного классификатора случайных лесов (RF) в масштабе одного дерева. RF классификатор написан на языке R и учитывает 28 переменных. Точность классификации RF на основе множественных характеристик БПЛА составила 91,3%, что на 20,5% выше результатов, полученных с использованием карт Baidu с высоким разрешением. Погрешность определения высоты дерева и диаметра кроны составляет 2,882% и 6,241% соответственно. В исследо-

вании установлено, что размер окна текстуры влияет на точность классификации RF. Оптимальный размер окна зависит от ландшафта и в их случае наилучшую точность показывает при размере 9x9. Упомянуто, что извлечение с БПЛА данные не только точнее, но и дешевле. Стоимость изображений с высоким пространственным разрешением от 1 до 14 евро/км^2. Анализ показал, что текстурная информация, извлеченная из изображения сверхвысокого разрешения БПЛА, может весьма точно отражать характеристики листьев конкретных растений, что имеет большое значение для мониторинга городских лесов. В этой работе прослеживается совмещение нескольких подходов: DIPC и ITD. Подобное совмещение подходов может быть более эффективно с позиции контроля за количеством насаждений в конкретный временной период. Еще одним примером, может служить работа [45], в которой авторы совместили обработку облака точек, бортовое лазерное сканирование (airbone laser scanning ALS) и зональный подход. Они использовали высоту, плотность и спектральные показатели, полученные при использовании DIPC для расчета ABA (например, преобладающая высота, площадь основания и объем ствола), тогда как высота над землей для DIPC была рассчитана относительно положения земли, обнаруженного данными ALS. Кроме того, авторы делают выводы о том, что БПЛА — эффективное средство для инвентаризации лесов. В последующем, в работе 2020 года [45] продемонстрировано сравнение DIPC и ALS как в отдельности, так и при их синтезе. Так, показатели высоты доминирующего слоя дерева по данным DIPC показали сильную корреляцию с аналогичными показателями, рассчитанными по данным ALS. Модели на основе ALS, примененные с показателями DIPC, показали хорошие результаты, в особенности если модель ABA была предварительно адаптирована к исследуемому географическому району.

Заключение

В статье представлен обзор последних исследований по тематике экомониторинга с применением БПЛА. Полученные результаты работы могут служить основой для совершенствования механизмов реализации экологического мониторинга в условиях Российской Федерации. На основании изученных работ были определены и выделены ключевые сферы применения дронов: оценка абиотических и биотических составляющих природных и антропогенно-трансформированных экосистем. Каждая сфера подразделяется на основные направления. В отношении абиотических составляющих работы по использованию БПЛА распределены в разрезе следующих направлений: 1) оценка качества атмосферного воздуха «in situ»; 2) инструмент для отбора проб и последующей транспортировки. В отношении биотических: 1) исследование влияний деструктивных факторов по отношению к живым существам; 2) интеграция методов машинного обучения для экологического мониторинга биотических составляющих экосистем.

Использование БПЛА находится на данном этапе только в начале пути и предстоит провести еще значительное количество исследований прежде, чем внедрять данный инструмент без каких-либо опасений в отношении возникновения негативных последствий. Однако, уже сейчас прослеживается тенденция в развитии этого инструмента от именно инструмента до субъекта, то есть полноценного участника взаимодействия в системе «человек-природа», который

не только будет наблюдать и использоваться как пробоотборник, но и вовремя реагировать на негативные воздействия окружающей среды (например, очищать воздух путем впрыскивания растворов-нейтрализаторов, чипировать новых особей популяций, или же проводить экстренную ветеринарную помощь для представителей фауны и др. подобные направления).

REFERENCES/СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morawska L.*, *Thai P. K.*, *Liu X.*, Asumadu-*Sakyi A.*, *Ayoko G.*, *Bartonova A.*, *Bedini A.*, *Chai F.*, *Christensen B.*, *Dunbabin M.*, *Gao J.*, *Hagler G. S.* W., *Jayaratne R.*, *Kumar P.*, *Lau A. K.* H., *Louie P. K.* K., *Mazaheri M.*, *Ning Z.*, *Motta N.*, *Mullins B.*, *Rahman M. M.*, *Ristovski Z.*, *Shafiei M.*, *Tjondronegoro D.*, *Westerdahl D.*, *Williams R.* Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?. Environment International. 2018. Vol. 116. P. 286–299. DOI: 10.1016/j.envint.2018.04.018.

2. *Zellweger F.*, *Frenne P.*, *Lenoir J.*, *Rocchini D.*, *Coomes D.* Advances in Microclimate Ecology Arising from Remote Sensing. Trends in Ecology & Evolution. 2019. Vol. 34, no. 4. pp. 327–341. DOI: 10.1016/j.tree.2018.12.012.

3. *Vtoriy V. F.*, *Vtoriy S. V.* Prospects of ecological monitoring of agricultural facilities using unmanned aerial vehicles. AgroJekoInzhenerija. 2017. no. 92. pp. 158–166. [In Russ.] (*Вторый В. Ф.*, *Вторый С. В.* Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов. АгроЭкоИнженерия. 2017. № 92. С. 158–166.).

4. *Rumyantsev V. A.*, *Yakovlev V. A.*, *Novikov I. A.*, *Zhurenkov A. G.*, *Maksin S. V.* Innovative methods of environmental monitoring of water resources. Innovations. 2014. no. 5 (187). pp. 118–120 [In Russ.] (*Румянцев В. А., Яковлев В. А., Новиков И. А., Журенков А. Г., Максин С. В.* Инновационные методы экологического мониторинга водных ресурсов. Инновации. 2014. № 5 (187). С. 118–120.) .

5. *Potapov E. R.*, *Utekhina I. G.*, *McGrady M. J.*, *Rimlinger D.* Usage of UAV for surveying Steller's sea eagle nests. Raptors Conserv. 2013. no. 27. pp. 253–260.

6. *Koh L. P.*, *Wich S. A.* Dawn of Drone Ecology: Low-Cost Autonomous Aerial Vehicles for Conservation. Tropical Conservation Science. 2012. Vol. 5, no. 2. pp. 121–132. DOI: 10.1177/194008291200500202.

7. *Shelare S. D.*, *Aglawe K. R.*, *Waghmare S. N.*, *Belkhode P. N.* Advances in water sample collections with a drone — A review. Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 47. pp. 4490–4494. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.327.

8. *Ventura D.*, *Bonifazi A.*, *Gravina M. F.*, *Ardizzone G. D.* Unmanned Aerial Systems (UASs) for Environmental Monitoring: A Review with Applications in Coastal Habitats. InTech. 2017. pp. 165–184. DOI: 10.5772/intechopen.69598.

9. *Villa T. F.*, *Gonzalez F.*, *Miljievic B.*, *Ristovski Z. D.*, *Morawska L.* An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Prospectives. Sensors. 2016. Vol. 16, no. 7. 1072 p. DOI: 10.3390/s16071072.

10. *Maes W. H.*, *Steppe K.* Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. Trends in Plant Science. 2019. Vol. 24. pp. 152–164. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.11.007.

11. *Burgués J.*, *Marco S.* Environmental chemical sensing using small drones: A review. Science of The Total Environment. 2020. Vol. 748. 141172. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141172.

12. *Villa T. F.*, *Salimi F.*, *Morton K.*, *Morawska L.*, *Gonzalez F.* Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. Sensors. 2016. Vol. 16, no. 12. 2202 p. DOI: 10.3390/s16122202.

13. *Marturano F.*, *Martellucci L.*, *Chierici A.*, *Malizia A.*, *Giovanni D. D.*, d'*Errico F.*, *Gaudio P.*, *Ciparisse J.*-F. Numerical Fluid Dynamics Simulation for Drones' Chemical Detection. Drones. 2021. Vol. 5, no. 3. 69 p. DOI: 10.3390/drones5030069.

14. *Rudiyanto B.*, *Hariono B.*, *Budiprasojo A.* Quadcopter Surveyor Drone Wind Velocity Data Characteristic for Optimal Hotwire Sensor Position. J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1569, no. 3. 032096 p. DOI: 10.1088/1742–6596.

15. *Zhu Y.*, *Wu Z.*, *Park Y.*, *Fan X.*, *Bai D.*, *Zong P.*, *Qin B.*, *Cai X.*, *Ahn K.*-H. Measurements of atmospheric aerosol vertical distribution above North China Plain using hexacopter. Science of The Total Environment. 2019. Vol. 665. pp. 1095–1102. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.100.

16. *Rohi G.*, *Ejofodomi O.*, *Ofualagba G.* Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. Heliyon. 2020. Vol. 6, no. 1. e03252. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03252.

17. *Zheng T.*, *Li B.*, *Li X.*-B., *Wang Z.*, *Li S.*-Y., *Peng Z.*-R. Vertical and horizontal distributions of traffic-related pollutants beside an urban arterial road based on unmanned aerial vehicle observations. Building and Environment. 2021. Vol. 187. 107401 p. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107401.

18. *Hildmann H.*, *Kovacs E.*, *Saffre F.*, *Isakovic A. F.* Nature-Inspired Drone Swarming for Real-Time Aerial Data-Collection Under Dynamic Operational Constraints. Drones. 2019. Vol. 3, no. 3. 71 p. DOI: 10.3390/drones3030071.

19. *Shen L.*, *Wang Y.*, *Liu K.*, *Yang Z.*, *Shi X.*, *Yang X.*, *Jing K.* Synergistic path planning of multi-UAVs for air pollution detection of ships in ports. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2020. Vol. 144. 102128 p. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102128.

20. *Ahlawat A.*, *Mishra S. K.*, *Gumber S.*, *Goel V.*, *Sharma C.*, *Wiedensohlerd A.* Performance evaluation of light weight gas sensor system suitable for airborne applications against co-location gas analysers over Delhi. Science of The Total Environment. 2019. Vol. 697. 134016 . DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134016.

21. *Suherman S.*, *Ananda R.*, *Pinem M.* Environmental Sensor Assessment for a Light Quadcopter Drone. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 851, no.1. 012017 з. DOI: 10.1088/1757–899X.

22. *Scheutz C.*, *Kjeldsen P.* Guidelines for landfill gas emission monitoring using the tracer gas dispersion method. Waste Management. 2019. Vol. 85. pp. 351–360. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.12.048.

23. Ruiz-*Jimenez J.*, *Zanca N.*, *Lan H.*, *Jussila M.*, *Hartonen K.*, *Riekkola M.*-L. Aerial drone as a carrier for miniaturized air sampling systems. Journal of *Chromatography A.* 2019. Vol. 1597. pp. 202–208. DOI: 10.1016/j.chroma.2019.04.009.

24. *Simms L. A.*, *Borras E.*, *Chew B. S.*, *Matsui B.*, *McCartney M. M.*, *Robinson S. K.*, *Kenyon N.*, *Davis C. E.* Environmental sampling of volatile organic compounds during the 2018 Camp Fire in Northern California. Journal of Environmental Sciences. 2021. Vol. 103. pp. 135–147. DOI: 10.1016/j.jes.2020.10.003.

25. *Li C.*, *Han W.*, *Peng M.*, *Zhang M.*, *Yao X.*, *Liu W.*, *Wang T.* An Unmanned Aerial Vehicle-Based Gas Sampling System for Analyzing CO2 and Atmospheric Particulate Matter in Laboratory. Sensors. 2020. Vol. 20, no. 4. 1051 p. DOI: 10.3390/s20041051.

26. *Black O.*, *Chen J.*, *Scircle A.*, *Zhou Y.*, *Cizdziel J. V.* Adaption and use of a quadcopter for targeted sampling of gaseous mercury in the atmosphere. Environ Sci Pollut Res Int. 2018. Vol. 25, № 13. pp. 13195–13202. DOI: 10.1007/s11356–018–1775-y.

27. *Chang C.*-C., *Chen W.*-N., *Tsai Y.*-J., *Chang S.*-Y. Determination of the vertical profile of aerosol chemical species in the microscale urban environment. Environmental Pollution. 2018. Vol. 243. pp. 1360–1367. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.09.081.

28. *Andersen T.*, *Scheeren B.*, *Peters W.*, *Chen H.* A UAV-based active AirCore system for measurements of greenhouse gases. Atmospheric Measurement Techniques. 2018. Vol. 11, no. 5. pp. 2683–2699. DOI: 10.5281/zenodo.1230383.

29. *Karion A.*, *Sweeney C.*, *Tans P.*, *Newberger T.* AirCore: An Innovative Atmospheric Sampling System. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010. Vol. 27, no. 11. pp. 1839–1853. DOI: 10.1175/2010JTECHA1448.1.

30. *Andersen T.*, *Vinkovic K.*, *Vries M.* et al. Quantifying methane emissions from coal mining ventilation shafts using an unmanned aerial vehicle (UAV)-based active AirCore system. Atmospheric Environment: X. 2021. Vol. 12. 100135 p. DOI: 10.1016/j.aeaoa.2021.100135.

31. *Rebolo-Ifrán N.*, *Grilli M. G.*, *Lambertucci S. A.* Drones as a Threat to Wildlife: YouTube Complements Science in Providing Evidence about Their Effect. Environmental Conservation. 2019. Vol. 46, no. 3. pp. 205–210. DOI: 10.1017/S0376892919000080.

32. *Mo M.*, *Bonatakis K.* Approaching wildlife with drones: using scientific literature to identify factors to consider for minimising disturbance. Australian Zoologist. 2022. Vol. 42, no. 1. pp. 1–29. DOI: 10.7882/AZ.2021.015.

33. *Harris C. M.*, *Herata H.*, *Hertel F.* Environmental guidelines for operation of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS): Experience from Antarctica. Biological Conservation. 2019. Vol. 236. pp. 521–531. DOI: 10.1016/j.biocon.2019.05.019.

34. *Rümmler M.*-C., *Esefeld J.*, *Hallabrin M. T.*, *Christian P.*, *Mustafa O.* Emperor penguin reactions to UAVs: First observations and comparisons with effects of human approach. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2021. Vol. 23. 100545 p. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100545.

35. *Duporge I.*, *Spiegel M. P.*, *Thomson E. R.*, *Chapman T.*, *Lamberth C.*, *Pond C.*, *Macdonald D. W.*, *Wang T.*, *Klinck H.* Determination of optimal flight altitude to minimise acoustic drone disturbance to wildlife using species audiograms. Methods Ecol Evol. 2021. Vol. 12, no. 11. pp. 2196–2207. DOI: 10.1111/2041−210X.13691.

36. *Hartmann W. L.*, *Fishlock V.*, *Leslie A.* First guidelines and suggested best protocol for surveying African elephants (Loxodonta africana) using a drone. Koedoe. 2021. Vol. 63, no. 1. pp. 1–9. DOI: 10.4102/koedoe.v63i1.1687.

37. *Weston M. A.*, O'*Brien C.*, *Kostoglou K. N.*, *Symonds M. R.* E. Escape responses of terrestrial and aquatic birds to drones: Towards a code of practice to minimize disturbance. J Appl Ecol / ed. *McKenzie A.* 2020. Vol. 57, no. 4. pp. 777–785. DOI: 10.1111/1365−2664.13575.

38. *Vas E.*, *Lescroël A.*, *Duriez O.*, *Boguszewski G.*, *Grémillet D.* Approaching birds with drones: first experiments and ethical guidelines. Biology Letters. 2015. Vol. 11, no. 2. pp. 20140754. DOI: 10.1098/rsbl.2014.0754.

39. *Brunton E.*, *Bolin J.*, *Leon J.*, *Burnett S.* Fright or Flight? Behavioural Responses of Kangaroos to Drone-Based Monitoring. Drones. 2019. Vol. 3, no. 2. 41 p. DOI: 10.3390/drones3020041.

40. *Belcore E.*, *Wawrzaszek A.*, *Wozniak E.*, *Grasso N.*, *Piras M.* Individual Tree Detection from UAV Imagery Using Hölder Exponent. Remote Sensing. 2020. Vol. 12, no. 15. 2407 p. DOI: 10.3390/rs12152407.

41. *Kotivuori E.*, *Kukkonena M.*, *Mehtätalob L.*, *Maltamoa M.*, *Korhonena L.*, *Packalena P.* Forest inventories for small areas using drone imagery without in-situ field measurements. Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 237. 111404 p. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111404.

42. *Picos J.*, *Bastos G.*, *Míguez D.*, *Alonso L.*, *Armesto J.* Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR. Remote Sensing. 2020. Vol. 12, no. 5. 885 p. DOI: 10.3390/rs12050885.

43. *Tian Y.*, *Huang H.*, *Zhou G.*, *Zhang Q.*, *Tao J.*, *Zhang Y.*, *Lin J.* Aboveground mangrove biomass estimation in Beibu Gulf using machine learning and UAV remote sensing. Science of The Total Environment. 2021. Vol. 781. 146816 p. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146816.

44. *Wang X.*, *Wang Y.*, *Zhou C.*, *Yin L.*, *Feng X.* Urban forest monitoring based on multiple features at the single tree scale by UAV. Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 58. 126958 p. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126958.

45. *Puliti S.*, *Ørka H. O.*, *Gobakken T.*, *Næsset E.* Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. Remote Sensing. 2015. Vol. 7, no. 8. pp. 9632–9654. DOI: 10.3390/rs70809632. ГИАБ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрак Вера Васильевна[1] — канд. эконом. наук, доцент, заведующая научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, доцент кафедры экономики и менеджмента, e-mail: vera_yurak@mail.ru;
Малышев Александр Николаевич[1] — лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, e-mail: malyshev.k1b@gmail.com;
Завьялов Сергей Сергеевич[1] — младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, e-mail: doker_777@bk.ru;
[1] Уральский государственный горный университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия.
Для контактов: *Юрак В. В.*, e-mail: vera_yurak@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yurak V. V.[1], Head of the Research Laboratory of Disturbed Lands` and Technogenic Objects` Reclamation, Associate Professor of the Department of Economics and Management, PhD in Economics, e-mail: vera_yurak@mail.ru;
Malyshev A. N.[1], Laboratory Research Assistant of the Research Laboratory of Disturbed Lands` and Technogenic Objects` Reclamation, e-mail: malyshev.k1b@gmail.com;
Zavyalov S. S.[1], Junior researcher of the Research Laboratory of Disturbed Lands` and Technogenic Objects` Reclamation, e-mail: doker_777@bk.ru;
[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
For contacts: *Yurak V. V.,* e-mail: vera_yurak@mail.ru.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 14.09.2022; принята к печати 10.10.2022.
Received by the editors 16.06.2022; received after the review 14.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.