УДК 504.064.38:629.735-519 10.56564/27825264_2026_2_12

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ

Г. П. Малиновский

Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Технический прогресс в области навигационных систем, систем управления, элементов питания, средств связи и технологий производства привел к быстрому развитию и широкому распространению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В настоящее время БПЛА активно используют в научных исследованиях. С 2010 г. в базе данных Scopus проиндексировано более 200 тыс. научных работ, посвященных различным аспектам разработки и применения БПЛА. В то же время исследования в области Environmental Science составляют около 2 % публикаций. Цель данной работы – анализ существующего опыта использования беспилотных летательных аппаратов для научных исследований в области экологического мониторинга урбанизированной среды и обобщение основных направлений их применения в исследованиях атмосферного загрязнения. Проанализированы исследования концентрации взвешенных частиц, газообразных загрязнителей атмосферы, парниковых газов с использованием БПЛА. Рассмотрены основные используемые методы, средства измерения, получаемые результаты. Сформулированы преимущества, ограничения и перспективы применения БПЛА для экологического мониторинга в городской среде.

Ключевые слова: БПЛА; экологический мониторинг; урбанизированная среда; взвешенные вещества; парниковые газы.

1. Введение

Технический прогресс в области навигационных систем, систем управления, элементов питания, средств связи и технологий производства привел к быстрому развитию и широкому распространению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Под БПЛА понимают летательный аппарат без экипажа на борту, управляемый дистанционно оператором или функционирующий в автоматическом режиме по заданной программе. В научной и нормативной литературе также используют термины: «беспилотные авиационные системы» (БАС) и «беспилотные воздушные суда» (БВС). В англоязычных публикациях чаще применяются термины: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) и Unmanned Aircraft System (UAS).

В настоящее время БПЛА активно используют в различных сферах деятельности: в сельском и лесном хозяйстве, мониторинге природных ресурсов, контроле инфраструктуры, логистике, геодезии, строительстве, а также для экологических исследований. Благодаря возможности оперативного получения пространственно распределенных данных, БПЛА стали важным инструментом дистанционного наблюдения за природными и антропогенными процессами.

Использование БПЛА в научных исследованиях – активно развивающееся направление. По данным международных научных баз данных, количество публикаций, содержащих упоминание беспилотных авиационных систем, увеличилось более чем в десять раз за период с 2010 по 2024 г. Всего за этот период опубликовано около 200 тыс. (по базе данных Scopus) научных работ, посвященных различным аспектам разработки и применения БПЛА.

Наибольшая доля публикаций относится к областям engineering, computer science и mathematics, на которые приходится около двух третей всех исследований. Значительная часть работ посвящена техническим аспектам функционирования беспилотных систем: разработке алгоритмов управления, планирования и

оптимизации маршрутов полета [1], организации воздушного движения [2, 3], вопросам безопасности и конфиденциальности [3, 4].

В то же время исследования в области Earth and Planetary Sciences и Environmental Science составляют меньшую долю публикаций (8 и 2 % соответственно по базе данных Scopus), однако демонстрируют устойчивый рост. В этих работах БПЛА рассматриваются как инструмент для получения пространственно распределенной экологической информации.

Развитие урбанизации сопровождается усилением антропогенной нагрузки на окружающую среду. Атмосфера городов характеризуется сложной структурой загрязнения, обусловленной транспортными выбросами, промышленными предприятиями, коммунальной инфраструктурой и особенностями городской застройки. В условиях городской среды наблюдаются выраженные горизонтальные и вертикальные градиенты концентраций загрязняющих веществ, которые не всегда могут быть выявлены традиционными стационарными системами мониторинга. Применение БПЛА позволяет получать данные с высоким пространственным и временным разрешением, включая вертикальные профили концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Это делает беспилотные системы перспективным инструментом для исследования структуры загрязнения воздуха в городах, выявления локальных источников выбросов и уточнения моделей атмосферного переноса примесей.

Цель данной работы – анализ существующего опыта использования беспилотных летательных аппаратов для научных исследований в области экологического мониторинга урбанизированной среды и обобщение основных направлений их применения в исследованиях атмосферного загрязнения.

2. Общие сведения о БПЛА, типы

По конструктивным особенностям БПЛА обычно подразделяют на несколько следующих основных типов:

1. Мультироторные аппараты (мультикоптеры, дроны). К данной категории относят квадрокоптеры, гексакоптеры и октокоптеры, это наиболее распространенные платформы для экологического мониторинга, особенно в условиях городской среды. Основные преимущества мультикоптеров – вертикальный взлет и посадка, высокая маневренность и возможность зависания в воздухе на фиксированной высоте. Эти характеристики позволяют проводить детальные измерения вертикальных профилей концентраций загрязняющих веществ.

2. БПЛА самолетного типа (с фиксированным крылом). Такие аппараты характеризуются более высокой продолжительностью полета и большей дальностью перемещения по сравнению с мультикоптерами. Они способны достигать высот нескольких километров и используются для исследований вертикальной структуры атмосферы и регионального переноса аэрозолей.

3. Беспилотные вертолеты. Данный тип аппаратов обладает высокой грузоподъемностью и может использоваться для размещения более тяжелых измерительных комплексов, однако применяют его сравнительно редко из-за высокой стоимости и сложности эксплуатации.

4. Гибридные системы (VTOL). Аппараты вертикального взлета и посадки сочетают преимущества мультикоптеров и самолетных платформ, обеспечивая вертикальный старт и эффективный горизонтальный полет.

При исследовании атмосферного загрязнения наиболее часто используют мультикоптерные платформы. Аппараты такого типа позволяют проводить измерения в диапазоне высот от поверхности земли до 100–150 м, что соответствует зоне проживания населения и уличных каньонов. Коммерческие модели дронов обычно ограничены высотой ниже 500 м [5]. Самолетные БПЛА позволяют расширить диапазон наблюдений до высот 1–3 км и более [6].

3. Применение БПЛА для экологического контроля состояния атмосферы

3.1. Мониторинг взвешенных частиц (PM)

Для измерения концентраций взвешенных частиц на БПЛА применяют миниатюрные аэрозольные спектрометры [7] или оптические лазерные счетчики частиц [8]. Первые позволяют получать надежные данные о распределении частиц по размерам, но они более сложные и дорогие. Вторые оценивают массовую концентрацию PM1, PM2.5, PM10, обладают сравнительно невысокой стоимостью и малым весом, что делает их предпочтительными для установки на дроны. Некоторые оптические счетчики имеют несколько размерных каналов, но эти данные обычно используют для внутреннего расчета массовой концентрации и редко публикуют как самостоятельный результат, поскольку калибровка сенсора по размерам частиц требует дополнительных сложных процедур и обычно не проводится в полевых условиях.

Перед началом эксперимента низкобюджетные сенсоры, устанавливаемые на БПЛА, калибруют с использованием стационарных аэрозольных спектрометров или фотометров. Это позволяет скорректировать систематические ошибки и получить данные, сопоставимые с показаниями референсных приборов.

Основные направления исследований

Наиболее часто с использованием БАС исследуют вертикальное распределение концентрации частиц. Например, в работе [7] показано, что концентрация относительно крупных взвешенных частиц (PM10) зависит от температурных инверсий и увеличивается вблизи поверхности, а мелкие (PM1) распределены равномерно по высоте. Как правило, при исследовании вертикального распределения также проводят анализ влияния метеорологических факторов, суточной или сезонной динамики содержания частиц в атмосфере [7–10].

Отдельно можно выделить исследования антропогенного влияния на концентрации аэрозольных частиц, в том числе в урбанизированной среде. В работе [11] показано снижение концентрации PM2.5 и PM10 при наличии придорожного древесного полога. В работе [12] исследуют различие профилей концентраций над разными типами поверхностей. В работе [13] выявлена связь распределения концентрации PM2.5 с типом трафика на дороге и высотой примыкающих зданий. Обнаружено, что на перекрестках с преобладанием легковых автомобилей концентрация PM2.5 на высоте 15 м может быть на 30 % выше, чем на уровне земли, что опровергает распространенное мнение о монотонном снижении загрязнения с высотой.

Во всех исследованиях такого типа принимают меры для исключения влияния турбулентности от винтов, такие как забор воздуха сверху аппарата и использование выносных трубок воздухозаборника.

3.2. Мониторинг газообразных загрязняющих примесей в атмосфере

Для регистрации газообразных загрязняющих веществ чаще всего используют электрохимические сенсоры [14, 15]. Они позволяют селективно регистрировать широкий спектр веществ (оксиды азота, оксиды серы, угарный газ, озон), обладают малым весом и низким энергопотреблением, при этом способны измерять концентрации в широком диапазоне – от фоновых значений (единицы ppb) до высоких залповых выбросов (сотни ppm). Это особенно важно для мониторинга вблизи промышленных зон или свалок, где концентрации могут резко меняться. Но есть ограничения, которые могут влиять на показания: температура и влажность, а также перекрестная чувствительность для некоторых соединений. При этом отмечается, что работа пропеллеров не влияет на показания сенсоров [14].

Если требуется обнаружить не конкретное вещество, а широкий спектр газов (например, в задачах поиска утечек), то используют металлооксидные сенсоры. Такие детекторы позволяют, например, измерять общее содержание летучих органических соединений (Volatile Organic Compounds, VOC) без разделения на компоненты [16, 17].

Если необходим детальный спектр VOC, используют следующий подход. Дрон отбирает пробу воздуха в интересующей точке и доставляет ее на землю. Отобранную пробу анализируют в лаборатории [18]. В некоторых случаях используется мобильная лаборатория в автомобиле [17]. Есть опыт измерения 18 VOC в реальном времени с использованием тяжелых платформ грузоподъемностью до 40 кг, на которых размещается профессиональный прибор [19].

Использование комплекса БПЛА и газовых сенсоров позволяет исследовать как распределенные источники загрязнения атмосферы, так и точечные. Например, в работе [20] построены карты пространственного и высотного распределения загрязнений вблизи крупной автомагистрали в Польше. В работе [21] описан случай, когда гексакоптер с измерительной системой залетал прямо в шлейф дыма от судов в порту Шанхая. По соотношению SO_2/NO_2 удалось определить тип топлива: для высокосернистого топлива отношение превышало 1, для низкосернистого было меньше 1.

Исследования озона демонстрируют рост концентрации с высотой, что объясняется, во-первых, более интенсивным озонообразованием под влиянием УФ-радиации и, во-вторых, разрушением озона в нижних слоях при взаимодействии с NO [22].

3.3. Мониторинг парниковых газов

Большое количество статей посвящено исследованию парниковых газов. БПЛА используют для выявления локальных источников выбросов метана, оценки эмиссии от различных источников, включая полигоны твердых бытовых отходов и сельскохозяйственные объекты, поиска утечек в газотранспортных системах. Также беспилотники применяются для оценки вертикального распределения парниковых газов и верификации спутниковых измерений и инвентаризационных оценок.

Например, в работе [23] проведена оценка эмиссии CH_4 и CO_2 из системы вентиляции угольных шахт в Польше. Показано, что зависимость измеряемых величин от погодных условий и короткое время полета БПЛА приводят к значительным неопределенностям в оценке. В работе [24] измерения проводили в крупном китайском мегаполисе Чжэнчжоу. На основе большого количества измерений (общая протяженность маршрута составила 170 км) была построена карта концентраций CH_4 и CO_2, сделан вывод, что для построения репрезентативных карт стационарные посты мониторинга нужно располагать на расстоянии не более 4 км. По соотношению концентраций двух газов выявлены точечные источники загрязнения: газозаправочная станция (аномально высокое отношение CH_4/CO_2, указывающее на утечку природного газа) и железнодорожная станция (повышенные концентрации CO_2 от тепловозов). В работе [25] проводили измерения вертикальных профилей CO_2 в нижней тропосфере (до 500 м) минимум раз в месяц в течение года. Получено, что сезонные колебания были наибольшими у поверхности земли (на высоте 10 м амплитуда достигала 40 ppm) и снижались с высотой (до 30 ppm на 500 м). Это объясняется влиянием фотосинтеза и дыхания растений в приземном слое.

Недисперсионный инфракрасный анализ (NDIR) – наиболее распространенный метод для измерения парниковых газов, используемый как в стационарных системах, так и на БПЛА [26–28]. Метод основан на измерении ослабления света определенной длины волны, прошедшего через кювету с анализируемой газовой смесью. Такие сенсоры относительно дешевы и имеют малый вес, что позволяет размещать их на небольших дронах. В то же время отмечается зависимость показаний от таких параметров окружающей среды, как температура, давление и влажность [26].

Другой часто используемый подход – отбор проб воздуха в специальные пробоотборники и последующее измерение на высокоточных приборах методом внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS) [23, 24].

Встречается применение лазерных спектрометров, установленных на БПЛА [29], при этом применяется не CRDS-спектрометр, а метод внеосевой спектроскопии с интегрированием выходного сигнала резонатора (Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy, OA-ICOS). Такие приборы имеют гораздо меньший вес и менее чувствительны к вибрациям, что важно для бортовых измерений.

4. Преимущества и недостатки БПЛА по сравнению со стационарными постами и спутниковым мониторингом

В настоящее время стационарные посты – основное средство экологического мониторинга в населенных пунктах. В России стационарные посты создает Росгидромет, существует несколько региональных сетей, а также собственные посты и локальные системы создают крупные предприятия в границах их санитарно-защитных зон. Стационарные посты оснащают газоанализаторами, анализаторами взвешенных веществ и метеокомплексами, и они могут работать в автономном режиме. Для решения оперативных задач также используют наземные мобильные посты. Еще один метод экологического мониторинга – дистанционное зондирование Земли из космоса. Спутники оснащают мультиспектральными камерами, которые позволяют оценивать состав атмосферы, в том числе диоксид азота, метан, озон, взвешенные вещества и другие параметры. Интерпретация данных космического зондирования требует сложной математической обработки и верификации по данным наземных постов.

Проведенный анализ различных примеров использования беспилотных летательных аппаратов позволяет отметить ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами экологического мониторинга.

1. Высокое пространственное разрешение измерений. БПЛА позволяют проводить измерения непосредственно в интересующих точках пространства, включая участки вблизи источников выбросов [11, 24].

2. Возможность получения вертикальных профилей атмосферы. Наземные станции мониторинга фиксируют концентрации загрязняющих веществ только на уровне установки приборов. БПЛА позволяют получать данные о распределении примесей по высоте [6, 7].

3. Мобильность и оперативность. Беспилотные системы могут быстро перемещаться между различными участками города и выполнять измерения в труднодоступных или опасных зонах [21, 30].

4. Формирование трехмерных полей концентраций загрязнений. Использование серии полетов позволяет формировать пространственные модели распределения загрязняющих веществ [24, 28].

5. Возможность валидации дистанционных методов наблюдений. Данные БПЛА используют для проверки результатов спутникового и лидарного мониторинга атмосферы [22, 25].

В то же время, несмотря на значительные преимущества, использование беспилотных систем имеет ряд ограничений.

1. Ограниченная продолжительность полета. Для мультикоптеров время полета обычно составляет 20–30 минут, что ограничивает возможность проведения длительных наблюдений [23].

2. Зависимость от метеорологических условий. Сильный ветер, осадки и неблагоприятные погодные условия могут существенно ограничивать возможность выполнения полетов [8, 13].

3. Регуляторные ограничения. В городских условиях использование БПЛА регулируется авиационными правилами и требует согласования с органами управления воздушным движением [13, 31].

4. Ограниченная точность малогабаритных сенсоров. На БПЛА часто устанавливают компактные непрофессиональные датчики, которые обладают меньшей точностью по сравнению со стационарными аналитическими приборами и требуют обязательной калибровки [8, 14].

4. Заключение

Преимущества БАС для целей экологического мониторинга по сравнению со стационарными постами очевидны для специалистов. Они обеспечивают недоступные стационарным постам возможности оперативного экологического контроля, выявления локальных источников загрязнения, анализа вертикальной структуры атмосферы, пространственной детализации и динамичности наблюдений. БПЛА можно использовать для мониторинга промышленных и транспортных выбросов при отсутствии стационарных постов. Безусловно, системы на основе БПЛА не могут рассматриваться в качестве замены стационарных постов, однако в перспективе могут стать важным функциональным расширением традиционных систем экологического мониторинга городской среды. Контроль физико-химических параметров атмосферы с применением БПЛА позволяет со значительно большей эффективностью решать ключевые задачи экологического мониторинга в государственном надзоре, производственном контроле на предприятиях, общественной экологической экспертизе и оперативном реагировании на чрезвычайные ситуации.

В последние годы развитие технологий позволило значительно снизить массу летательных аппаратов и детектирующих устройств. При низкой массе БПЛА вероятность аварий с тяжелым исходом значительно снижается, что позволяет рассматривать возможность применения этих устройств в урбанизированной среде.

Современная приборная база позволяет обеспечивать требуемую точность, воспроизводимость и диапазон измеряемых величин по основным загрязнителям атмосферы городской среды. Стоимость основных модификаций используемых датчиков относительно невысокая, что в сочетании с постоянным снижением стоимости самих летательных аппаратов также повышает востребованность систем экологического мониторинга на основе БПС.

В то же время фактически отсутствуют средства измерения, специально предназначенные для использования на базе БПЛА. Применяемые счетчики взвешенных частиц и электрохимические сенсоры газовых загрязнителей не являются готовыми средствами измерения. Им требуется управляющий контроллер, блок памяти и источник питания. Каждая установка фактически уникальна и не вносится в соответствующий реестр средств измерений. Таким образом, все результаты измерения не могут быть референсными и носят информационный, оценочный характер.

Необходимо отметить, что методики проведения обследований с применением БПС для мониторинга экологических параметров находятся только на начальном этапе развития. Для эффективного применения БПЛА при выполнении функций государственного надзора, контроля и мониторинга окружающей среды, а также в производственном контроле на предприятиях требуется разработка целого комплекса таких методик.

Возможность применения беспилотных систем значительно расширяет методологическую базу не только прикладных разработок, но и фундаментальных научных исследований. В качестве потенциальных новых направлений исследований экологического состояния городской среды с применением БПЛА, оснащенных сенсорами загрязнения атмосферы, можно рассматривать изучение физических закономерностей перераспределения потоков загрязняющих веществ в трехмерном пространстве городской застройки с построением 3D-моделей с высоким

разрешением, исследование неоднородностей локальных и распределенных источников загрязнения, в том числе с учетом труднодоступных мест и др. Новые научные результаты позволят совершенствовать существующие и развивать принципиально новые подходы к изучению состояния окружающей среды.

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

5. Список литературы

1. Evolutionary computation for unmanned aerial vehicle path planning: a survey / Y. Jiang, X. X. Xu, M.-Y. Zheng, Z.-H. Zhan // Artificial Intelligence Review. – 2024. – Vol. 57, No 10. – P. 1–28. – DOI 10.1007/s10462-024-10913-0.
2. UAV trajectory planning: A comprehensive review and future directions / B. Liu, Y. Zhang, Z. Chen [et al.] // Communications in Transportation Research. – 2025. – Vol. 5. – P. 100195. – DOI 10.1016/j.commtr.2025.100195.
3. A survey of autonomous vehicle regulations: The United States, Europe, and China / B. Rao, A. G. Gopi, R. Maione [et al.] // Technology in Society. – 2016. – Vol. 45. – P. 1–10. – DOI 10.1016/j.techsoc.2016.02.009.
4. *Finn, R. L.* The use of unmanned aerial vehicles for civilian applications: A regulatory perspective / R. L. Finn, D. Wright // Computer Law & Security Review. – 2012. – Vol. 28, No 2. – P. 192–203. – DOI 10.1016/j.clsr.2012.01.005.
5. *Peksa, J. A* State-of-the-Art Review on Copter Drones and Their Components / J. Peksa, D. Mamchur // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No 11. – P. 3349. – DOI 10.3390/s24113349.
6. High-resolution vertical profiling of aerosols microphysical and optical properties during the 2024 LEADER UAV campaign in Nadarzyce (Poland) / K. M. Markowicz, M. T. Chiliński, W. Panfil [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2025. – Vol. 32. – P. 20695–20713. – DOI 10.1007/s11356-025-36887-2.
7. Atmospheric stratification dynamics of size-segregated urban particulate matter in the mixed layer using a UAV-mounted aerosol spectrometer / A. M. Canales, J. Lagos Q., M. A. Leiva-Guzman, A. R. Toro // Science of the Total Environment. – 2025. – Vol. 1008. – P. 180991. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2025.180991.
8. Evaluation of vertical and horizontal distribution of particulate matter near an urban roadway using an unmanned aerial vehicle / R. Dubey, A. K. Patra, J. Joshi [et al.] // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 836. – P. 155600. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.155600.
9. Vertical Profiling of PM_1 and $PM_{2.5}$ Dynamics: UAV-Based Observations in Seasonal Urban Atmosphere / Z. Zhao, Y. Pang, B. Qi [et al.] // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16, No 8. – P. 968. – DOI 10.3390/atmos16080968.
10. Identification of particle distribution pattern in vertical profile via unmanned aerial vehicles observation / Z.-H. Chen, B.-W. Li, B. Li [et al.] // Environmental Pollution. – 2024. – Vol. 348. – P. 123893. – DOI 10.1016/j.envpol.2024.123893.
11. Vertical distribution of particulate matter near a national highway and influence of roadside tree canopy: A drone/UAV based study / R. Dubey, A. K. Patra, J. Joshi [et al.] // Atmospheric Environment. – 2024. – Vol. 336. – P. 120761. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2024.120761.
12. Vertical Distribution of Urban Near-surface Pollutant $PM_{2.5}$ Based on UAV Monitoring Platform / L. Han, J. Zhao, J. Zhang [et al.] // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 63. – P. 91–96. – DOI 10.3303/CET1863016.
13. *Zarei, M.* Vertical distribution analysis of $PM_{2.5}$ concentration at urban highway intersections using low-cost sensors and unmanned aerial vehicles / M. Zarei, B. Yeganeh // Urban Climate. – 2025. – Vol. 59. – P. 102243. – DOI 10.1016/j.uclim.2024.102243.
14. Preparation of electrochemical sensor assisted unmanned aerial vehicles system for SO_2, O_3, NO_2, CO and $PM_{2.5}$/PM_{10} detection in air / R. Guan, J. Yu, M. Li [et al.] // International Journal of Electrochemical Science. – 2021. – Vol. 16. – P. 211047. – DOI 10.20964/2021.10.21.
15. *Sharma, R*. UAV based long range environment monitoring system with Industry 5.0 perspectives for smart city infrastructure / R. Sharma, R. Arya // Computers & Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 168. – P. 108066. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108066.
16. Evaluation of an innovative proposal for the integration of chemical sensors with SPME fibers on UAVs, for forensic, military, and civil applications / M. Strano, D. Ricci, M. C. Pigro [et al.] // The

European Physical Journal Plus. – 2025. – Vol. 140. – P. 276. – DOI 10.1140/epjp/s13360-025-06157-8.
17. Advancing VOC management: A mobile and drone-based approach for industrial emission monitoring / C. Kang, H. Shin, H. Seo [et al.] // Atmospheric Environment. – 2026. – Vol. 369. – P. 121807. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2026.121807.
18. A modular approach to volatile organic compound samplers for tethered balloon and drone platforms / M. Guagenti, D. Dexheimer, A. Ulinksi [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2025. – Vol. 18, No 9. – P. 2125–2136. – DOI 10.5194/amt-18-2125-2025.
19. Real-Time Visual Monitoring and High Spatiotemporal-Resolution Mapping of Air Pollutants Using a Drone-Mass Spectrometer System / J. Zhang, Z. Zhou, Q. Huang [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2025. – Vol. 59, No 16. – P. 8099–8107. – DOI 10.1021/acs.est.5c02330.
20. An Assessment of the Possibility of Using Unmanned Aerial Vehicles to Identify and Map Air Pollution from Infrastructure Emissions / A. Jaroń, A. Borucka, P.Deliś, A. Sekrecka // Energies. – 2024. – Vol. 17, No 3. – P. 577. – DOI 10.3390/en17030577.
21. An Unmanned Aerial System for Ship Emissions Monitoring / F. Zhou, J. Gu, W. Chen, X. Ni // Atmosphere. – 2019. – Vol. 10, No 11. – P. 657. – DOI 10.3390/atmos10110657.
22. Vertical Profiles of $PM_{2.5}$ and O_3 Measured Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Their Relationships with Synoptic- and Local-Scale Air Movements / H. Hwang, J. E. Lee, S. A. Shin [et al.] // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No 9. – P. 1581. – DOI 10.3390/rs16091581.
23. Quantifying methane emissions from coal mining ventilation shafts using an unmanned aerial vehicle (UAV)-based active AirCore system / T. Andersen, K. Vinkovic, M. de Vries [et al.] // Atmospheric Environment X. – 2021. – Vol. 12. – P. 100135. – DOI 10.1016/j.aeaoa.2021.100135.
24. Spatial mapping of greenhouse gases using a UAV monitoring platform over a megacity in China / T. Han, C. Xie, Y. Yang [et al.] // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 951. – P. 175428. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2024.175428.
25. Measuring regional atmospheric CO2 concentrations in the lower troposphere with a non-dispersive infrared analyzer mounted on a UAV, Ogata Village, Akita, Japan / T. Chiba, Y. Haga, M. Inoue [et al.] // Atmosphere. – 2019. – Vol. 10, No 9. – P. 487. – DOI 10.3390/atmos10090487.
26. Toward establishing a Low-cost UAV Coordinated Carbon Observation Network (LUCCN): First integrated campaign in China / D. Yang, T. Zhao, L. Yao [et al.] // Advances in Atmospheric Sciences. – 2024. – Vol. 41, No 1. – P. 1–7. – DOI 10.1007/s00376-023-3107-5.
27. Ambient Carbon Dioxide in Industrial and Commercial Area Measured by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) / H. S. Huboyo, O. R. Manullang, B. P. Samadikun [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 448. – P. 012035. – DOI 10.1088/1755-1315/448/1/012035.
28. Three-dimensional spatiotemporal variability of CO_2 in suburban and urban areas of Shaoxing City in the Yangtze River Delta, China / Z. Wu, X. Pang, B. Xing [et al.] // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 881. – P. 163501. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2023.163501.
29. Application of Unmanned Aerial Vehicle Observation for Estimating City-Scale Anthropogenic CO_2 Emissions: A Case Study in Chengdu, Southwestern China / X. Xiang, K. Xiao, X. Wang [et al.] // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16, No 6. – P. 713. – DOI 10.3390/atmos16060713.
30. Unmanned aerial vehicle measurements of volcanic carbon dioxide fluxes / A. J. S. McGonigle, A. Aiuppa, G. Giudice [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2008. – Vol. 35, No 6. – P. L06303. – DOI 10.1029/2007GL032508.
31. Copter-Type UAV-Based Sensing in Atmospheric Chemistry: Recent Advances, Applications, and Future Perspectives / Y. Li, C. Zhang, W. Su [et al.] // Environmental Science and Technology. – 2025. – Vol. 59, No 27. – P. 13532–13550. – DOI 10.1021/acs.est.5c00074.

Сведения об авторе:

Малиновский Георгий Петрович, к. б. н., ст. н. с. Института промышленой экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл.почта: georgy@ecko.uran.ru

UNMANNED AERIAL VEHICLES USE FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF URBAN ENVIRONMENTS

G.P. Malinovsky

Institute of Industrial Ecology UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Technical progress in navigation systems, control systems, power sources, communication means, and manufacturing technologies has led to the rapid development and widespread adoption of unmanned aerial vehicles (UAVs). Currently, UAVs are actively used in scientific research. Since 2010, more than 200,000 scientific papers indexed in the Scopus database have been devoted to various aspects of UAV development and application. At the same time, research in the field of "Environmental Science" accounts for about 2% of these publications. The aim of this paper is to analyze the existing experience of using unmanned aerial vehicles for scientific research in the field of environmental monitoring of urban environment and to summarize the main directions of their application in studies of atmospheric pollution. Studies of particulate matter concentrations, gaseous atmospheric pollutants, and greenhouse gases using UAVs are analyzed. The main methods, measurement tools, and obtained results are reviewed. The advantages, limitations, and prospects of using UAVs for environmental monitoring in urban environment are formulated.

Key words: UAV, environmental monitoring, urban environment, particulate matter, greenhouse gases.

References

1. Evolutionary computation for unmanned aerial vehicle path planning: a survey / Y. Jiang, X. X. Xu, M.-Y. Zheng, Z.-H. Zhan // Artificial Intelligence Review. – 2024. – Vol. 57, No 10. – P. 1–28. – DOI 10.1007/s10462-024-10913-0.
2. UAV trajectory planning: A comprehensive review and future directions / B. Liu, Y. Zhang, Z. Chen [et al.] // Communications in Transportation Research. – 2025. – Vol. 5. – P. 100195. – DOI 10.1016/j.commtr.2025.100195.
3. A survey of autonomous vehicle regulations: The United States, Europe, and China / B. Rao, A. G. Gopi, R. Maione [et al.] // Technology in Society. – 2016. – Vol. 45. – P. 1–10. – DOI 10.1016/j.techsoc.2016.02.009.
4. *Finn, R. L.* The use of unmanned aerial vehicles for civilian applications: A regulatory perspective / R. L. Finn, D. Wright // Computer Law & Security Review. – 2012. – Vol. 28, No 2. – P. 192–203. – DOI 10.1016/j.clsr.2012.01.005.
5. *Peksa, J. A* State-of-the-Art Review on Copter Drones and Their Components / J. Peksa, D. Mamchur // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No 11. – P. 3349. – DOI 10.3390/s24113349.
6. High-resolution vertical profiling of aerosols microphysical and optical properties during the 2024 LEADER UAV campaign in Nadarzyce (Poland) / K. M. Markowicz, M. T. Chiliński, W. Panfil [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2025. – Vol. 32. – P. 20695–20713. – DOI 10.1007/s11356-025-36887-2.
7. Atmospheric stratification dynamics of size-segregated urban particulate matter in the mixed layer using a UAV-mounted aerosol spectrometer / A. M. Canales, J. Lagos Q., M. A. Leiva-Guzman, A. R. Toro // Science of the Total Environment. – 2025. – Vol. 1008. – P. 180991. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2025.180991.
8. Evaluation of vertical and horizontal distribution of particulate matter near an urban roadway using an unmanned aerial vehicle / R. Dubey, A. K. Patra, J. Joshi [et al.] // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 836. – P. 155600. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.155600.
9. Vertical Profiling of PM_1 and $PM_{2.5}$ Dynamics: UAV-Based Observations in Seasonal Urban Atmosphere / Z. Zhao, Y. Pang, B. Qi [et al.] // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16, No 8. – P. 968. – DOI 10.3390/atmos16080968.
10. Identification of particle distribution pattern in vertical profile via unmanned aerial vehicles observation / Z.-H. Chen, B.-W. Li, B. Li [et al.] // Environmental Pollution. – 2024. – Vol. 348. – P. 123893. – DOI 10.1016/j.envpol.2024.123893.

11. Vertical distribution of particulate matter near a national highway and influence of roadside tree canopy: A drone/UAV based study / R. Dubey, A. K. Patra, J. Joshi [et al.] // Atmospheric Environment. – 2024. – Vol. 336. – P. 120761. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2024.120761.
12. Vertical Distribution of Urban Near-surface Pollutant $PM_{2.5}$ Based on UAV Monitoring Platform / L. Han, J. Zhao, J. Zhang [et al.] // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 63. – P. 91–96. – DOI 10.3303/CET1863016.
13. *Zarei, M.* Vertical distribution analysis of $PM_{2.5}$ concentration at urban highway intersections using low-cost sensors and unmanned aerial vehicles / M. Zarei, B. Yeganeh // Urban Climate. – 2025. – Vol. 59. – P. 102243. – DOI 10.1016/j.uclim.2024.102243.
14. Preparation of electrochemical sensor assisted unmanned aerial vehicles system for SO_2, O_3, NO_2, CO and $PM_{2.5}$/PM_{10} detection in air / R. Guan, J. Yu, M. Li [et al.] // International Journal of Electrochemical Science. – 2021. – Vol. 16. – P. 211047. – DOI 10.20964/2021.10.21.
15. *Sharma, R*. UAV based long range environment monitoring system with Industry 5.0 perspectives for smart city infrastructure / R. Sharma, R. Arya // Computers & Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 168. – P. 108066. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108066.
16. Evaluation of an innovative proposal for the integration of chemical sensors with SPME fibers on UAVs, for forensic, military, and civil applications / M. Strano, D. Ricci, M. C. Pigro [et al.] // The European Physical Journal Plus. – 2025. – Vol. 140. – P. 276. – DOI 10.1140/epjp/s13360-025-06157-8.
17. Advancing VOC management: A mobile and drone-based approach for industrial emission monitoring / C. Kang, H. Shin, H. Seo [et al.] // Atmospheric Environment. – 2026. – Vol. 369. – P. 121807. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2026.121807.
18. A modular approach to volatile organic compound samplers for tethered balloon and drone platforms / M. Guagenti, D. Dexheimer, A. Ulinksi [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2025. – Vol. 18, No 9. – P. 2125–2136. – DOI 10.5194/amt-18-2125-2025.
19. Real-Time Visual Monitoring and High Spatiotemporal-Resolution Mapping of Air Pollutants Using a Drone-Mass Spectrometer System / J. Zhang, Z. Zhou, Q. Huang [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2025. – Vol. 59, No 16. – P. 8099–8107. – DOI 10.1021/acs.est.5c02330.
20. An Assessment of the Possibility of Using Unmanned Aerial Vehicles to Identify and Map Air Pollution from Infrastructure Emissions / A. Jaroń, A. Borucka, P.Deliś, A. Sekrecka // Energies. – 2024. – Vol. 17, No 3. – P. 577. – DOI 10.3390/en17030577.
21. An Unmanned Aerial System for Ship Emissions Monitoring / F. Zhou, J. Gu, W. Chen, X. Ni // Atmosphere. – 2019. – Vol. 10, No 11. – P. 657. – DOI 10.3390/atmos10110657.
22. Vertical Profiles of $PM_{2.5}$ and O_3 Measured Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Their Relationships with Synoptic- and Local-Scale Air Movements / H. Hwang, J. E. Lee, S. A. Shin [et al.] // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No 9. – P. 1581. – DOI 10.3390/rs16091581.
23. Quantifying methane emissions from coal mining ventilation shafts using an unmanned aerial vehicle (UAV)-based active AirCore system / T. Andersen, K. Vinkovic, M. de Vries [et al.] // Atmospheric Environment X. – 2021. – Vol. 12. – P. 100135. – DOI 10.1016/j.aeaoa.2021.100135.
24. Spatial mapping of greenhouse gases using a UAV monitoring platform over a megacity in China / T. Han, C. Xie, Y. Yang [et al.] // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 951. – P. 175428. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2024.175428.
25. Measuring regional atmospheric CO2 concentrations in the lower troposphere with a non-dispersive infrared analyzer mounted on a UAV, Ogata Village, Akita, Japan / T. Chiba, Y. Haga, M. Inoue [et al.] // Atmosphere. – 2019. – Vol. 10, No 9. – P. 487. – DOI 10.3390/atmos10090487.
26. Toward establishing a Low-cost UAV Coordinated Carbon Observation Network (LUCCN): First integrated campaign in China / D. Yang, T. Zhao, L. Yao [et al.] // Advances in Atmospheric Sciences. – 2024. – Vol. 41, No 1. – P. 1–7. – DOI 10.1007/s00376-023-3107-5.
27. Ambient Carbon Dioxide in Industrial and Commercial Area Measured by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) / H. S. Huboyo, O. R. Manullang, B. P. Samadikun [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 448. – P. 012035. – DOI 10.1088/1755-1315/448/1/012035.
28. Three-dimensional spatiotemporal variability of CO_2 in suburban and urban areas of Shaoxing City in the Yangtze River Delta, China / Z. Wu, X. Pang, B. Xing [et al.] // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 881. – P. 163501. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2023.163501.
29. Application of Unmanned Aerial Vehicle Observation for Estimating City-Scale Anthropogenic CO_2 Emissions: A Case Study in Chengdu, Southwestern China / X. Xiang, K. Xiao, X. Wang [et al.] // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16. – No 6. – P. 713. – DOI 10.3390/atmos16060713.

30. Unmanned aerial vehicle measurements of volcanic carbon dioxide fluxes / A. J. S. McGonigle, A. Aiuppa, G. Giudice [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2008. – Vol. 35, No 6. – P. L06303. – DOI 10.1029/2007GL032508.
31. Copter-Type UAV-Based Sensing in Atmospheric Chemistry: Recent Advances, Applications, and Future Perspectives / Y. Li, C. Zhang, W. Su [et al.] // Environmental Science and Technology. – 2025. – Vol. 59, No 27. – P. 13532–13550. – DOI 10.1021/acs.est.5c00074.