

Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 530—546.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(80):530—546.

ЭКОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья

УДК 502:629.735

doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546

Современные тенденции применения БПЛА в исследовании природных сред. Анализ зарубежных публикаций

Антон Игоревич Лучников

Горный институт Уральского Отделения Российской Академии Наук, г. Пермь,
Российская Федерация, e-mail: luchnikovanton@gmail.com

Аннотация. На основе тематических подборок статей зарубежных авторов за последние 20 лет (электронная библиотека LENS.ORG) рассмотрены тенденции стремительного развития и внедрения БПЛА в различные сферы человеческой деятельности, в том числе связанные с оценкой состояния окружающей среды. Проанализирована динамика публикаций во времени, по странам и рецензируемым научным журналам. Показан вклад технических (точных), естественных и социально-гуманитарных наук. Отмечен мультидисциплинарный подход в решении вопросов разработки, регулирования, применения БПЛА и последующего анализа результатов дистанционного зондирования. В заключении перечислены преимущества и недостатки технологии БПЛА, обозначены как хорошо изученные и широко применяемые методы и средства, так и перспективные направления, высказаны предположения о потенциале развития технологий БПЛА.

Ключевые слова: обзор литературы, библиографический анализ, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), естественные науки, геоэкология, мониторинг окружающей среды.

Для цитирования: Лучников А. И. Современные тенденции применения БПЛА в исследовании природных сред. Анализ зарубежных публикаций // Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 530—546. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546.

ECOLOGY. REVIEW

Original article

Current trends in the use of UAVs in the study of natural environments. Analysis of foreign publications

Anton I. Luchnikov

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, e-mail:
luchnikovanton@gmail.com

Summary. The article examines the trends in the rapid development and implementation of unmanned aerial vehicles (UAVs) in various spheres of human activity over the past two decades, based on publica-

© Лучников А. И., 2025

tions by foreign authors. Particular practical interest is the modern possibilities for using UAVs in fields related to natural resource management, as well as for assessing the impact of human activities on the environment. The generalization of accumulated experience in UAV usage is based on creating relevant thematic collections of scientific articles on UAVs using the resources of the LENS.ORG electronic library. The selection and analysis of significant publications and authors were carried out using bibliographic data from article collections in the VOSviewer program.

The article shows the contribution of natural, technical and humanitarian sciences in solving the issues of development, regulation, application and subsequent analysis of the results of remote sensing using UAVs. It analyzes the publication distribution and research topics based on various parameters, such as the number of publications over time, their distribution across scientific journals, and affiliations with publishing houses. Special attention is paid to the authors of the most cited publications and the main results of their research are briefly reviewed.

The literature review allowed us to identify the main areas of practical application for UAVs, including assessment of biodiversity, agronomy and precision agriculture, forestry, meteorology, natural and anthropogenic emergencies, etc. Many authors emphasize the significance of a multidisciplinary approach to solving fundamental and applied challenges related to the development of UAV technologies and techniques for acquiring geospatial data, as well as its storage, processing, and analysis. The types and specific models of unmanned aerial vehicles (UAVs) are analyzed, and their respective advantages and disadvantages are discussed. According to most experts, medium-sized UAVs (up to 20 kilograms) have the greatest potential for environmental research.

Keywords: review of articles, bibliographic analysis, unmanned aerial vehicle (UAV), natural sciences, technical sciences, environmental monitoring, geocology.

For citation: Luchnikov A. I. Current trends in the use of UAVs in the study of natural environments. Analysis of foreign publications. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(80):(530—546). doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-530-546. (In Russ.).

Введение

Накопленный к началу XXI века опыт применения «беспилотников» в военном деле, стремительный прогресс в технологиях (компьютерных, коммуникационных, производственных), миниатюризация компонентов и снижение себестоимости послужили толчком к развитию и частичной демилитаризации отрасли беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что открыло широкий спектр новых применений в гражданской и коммерческой сферах. Одним из первых направлений использования БПЛА на «гражданке» является поиск выживших после стихийных бедствий (США, 2006 г. *Федеральное управление гражданской авиации одобрило полеты беспилотников M/RQ-1 и M/RQ-9¹*). С этого периода времени отмечается существенный рост спроса на БПЛА по всему миру. Несмотря на нормативные, технические и эксплуатационные трудности, с которыми и сегодня сталкиваются как производители, так и пользователи «беспилотников», менее чем за 20 лет БПЛА были адаптированы под различные задачи и стали высокоэффективным инструментом в таких областях, как: сельское и лесное хозяйство, геодезия и картография, геоэкология, доставка грузов, образование и исследования, развлечения и спорт, обеспечение безопасности и службы спасения и т. д.

В настоящее время БПЛА прочно вошли в арсенал средств, технологий, применяемых при решении широкого круга задач, связанных с водным хозяйством,

¹ [Электронный ресурс] FAA authorizes Predators to seek survivors. 2006. URL: <https://www.globalsecurity.org/intell/library/news/2006/intell-060802-afpn02.htm> (дата обращения: 01.06.2025).

поэтому возникла потребность в выполнении обзора современных тенденций развития технологий с использованием БПЛА в смежных областях естественных наук. Особенностью представленного обзора о развитии и практическом применении БПЛА является анализ зарубежных источников литературы, что во многом обусловлено расположением основных рынков сбыта высокотехнологичной продукции в развитых странах, имеющих повышенные экономические возможности по приобретению и внедрению новых технологий в научно-производственные процессы. Анализ выполнялся по открытой электронной базе данных библиотеки LENS.ORG¹. Выбор данной платформы обусловлен ограничением доступа к электронным библиотекам WoS и Scopus, при этом абсолютное большинство высоко-рейтинговых журналов (по рассматриваемой тематике) содержатся в базе данных используемой электронной библиотеки.

Данные и методы исследования

Рассмотрим основные критерии отбора публикаций из электронной базы данных библиотеки LENS.ORG при создании тематических подборок. Из всех вариантов публикаций «document type» выбран единственный тип документа — статья в журнале «journal article». Данное условие позволило исключить или минимизировать вероятность попадания публикаций, похожих по содержанию одних и тех же авторов, например, опубликованных в трудах материалов конференций или книжных изданиях. Выбранный временной интервал — 20 лет. В первую тематическую подборку вошли все статьи, опубликованные за период с 01 января 2005 г. по 31 декабря 2024 г.

Поиск статей осуществлялся по их названиям «title», ключевым словам «keyword» и области исследований «field_of_study». Включение в поиск таких разделов как аннотация «abstract» или полный текст «full_text» негативно сказывалось на качестве тематической подборки. Поскольку БПЛА на английском языке, также как и в русском, имеют различные варианты написания, использованы все наиболее широко применяемые формулировки. Итоговый запрос к электронной базе данных имел следующий вид: «title:uav OR keyword:uav OR title:uas OR keyword:uas OR title:uavs OR keyword:uavs OR title:drone OR keyword:drone OR title:(unmanned aerial vehicle) OR keyword:(unmanned aerial vehicle) OR field_of_study:uav OR field_of_study:uas OR field_of_study:uavs OR field_of_study:drone OR field_of_study:(unmanned aerial vehicle)». Необходимо отметить, что в создаваемых тематических подборках не исключается попадание ряда публикаций, только косвенно относящихся к тематике БПЛА, поскольку их авторы могли указать широкий перечень ключевых слов. В результате в первую «Общую» тематическую подборку о БПЛА вошло 37 192 статьи, из них 24 826 цитируется в других научных работах, а открытый доступ имеют ~ 63,8 % статей (23 715).

Следующим этапом являлось создание тематической подборки (на основе «Общей»), посвященной исследованиям БПЛА и их применению в естественных

¹ [Электронный ресурс] URL: <https://www.lens.org/lens/search/scholar/list?q=> (дата обращения: 01.06.2025).

и технических науках. Необходимость учета статей по техническим направлениям исследований невозможно отделить по причине мультидисциплинарного подхода в исследованиях любой из природных сред с использованием высокотехнологичного оборудования. При решении поставленной задачи использовались различные фильтры, позволяющие находить и исключать статьи по критериям: информация о предмете исследований «subject» из «ISSN» и метаданных из «CrossRef»; информация об области исследования «field of study» основанная на результатах машинного обучения и разборе всего доступного текста записи о статье в электронной базе данных библиотеки OpenAlex (панель Microsoft Academic Graph). В ходе отбора по ключевым словам и темам исключались статьи, относящиеся к общественным и гуманитарным наукам, а также медицине. Таким образом, во вторую подборку вошли статьи, посвященные техническим аспектам создания и эксплуатации БПЛА и их использованию при решении научных задач в количестве 12 934 публикаций, из которых 9 025 цитируется в других научных работах, а в открытом доступе содержится ~ 72,7 % статей (9 407).

На заключительном этапе ставилась цель по отбору статей, где основные области исследований относятся к мониторингу элементов природных сред «Environmental science» и Экологии «Ecology». Для этого, как и этапом ранее, использовались различные фильтры, а дополнительным критерием установлено наличие цитирования публикации. Так, в третью тематическую подборку «Геоэкология» с применением БПЛА вошло 1 436 статей, из них 1 133 имеют открытый доступ ~ 78,9 %.

Целью данной статьи является анализ библиографических данных публикаций по отдельным параметрам, включенных в 3 тематические подборки: «Общая», «Естественно-техническая» и «Геоэкология».

Результаты и обсуждение

Динамика публикаций

Анализ количества и содержания зарубежных научных статей показал, что до 2011 г. общее количество публикаций (рис. 1), посвященных БПЛА, не превышало 100—200 шт., при этом доля статей в естественных и технических науках составляла не более 13—20 %. Начиная с 2012 г., прослеживается экспоненциальный рост количества статей, начавшийся с удвоения публикаций в 2012 г. Максимальное количество статей опубликовано в 2024 г. и, вероятно, эти показатели будут лишь увеличиваться. Похожая динамика прослеживается в количестве статей по естественным и техническим наукам, при этом ежегодно возрастает их доля в общем числе публикаций, а последние три года она составляет ~ 40 %. Наибольшее количество публикаций (243), посвященных вопросам геоэкологии, доля которых в исследованиях естественных и технических наук не превышает 15—17 %, наблюдалась в 2022 г. В то же время, при общей тенденции ежегодного роста научных статей о БПЛА и их применении в различных сферах, в экологическом направлении в последние два года отмечается двукратное сокращение числа публикаций с 243 до 123.



Рис. 1. Изменение количества научных статей о БПЛА за период с 2005 г. по 2024 г.

Fig. 1. Change in the number of scientific articles on UAVs for the period 2005—2024.

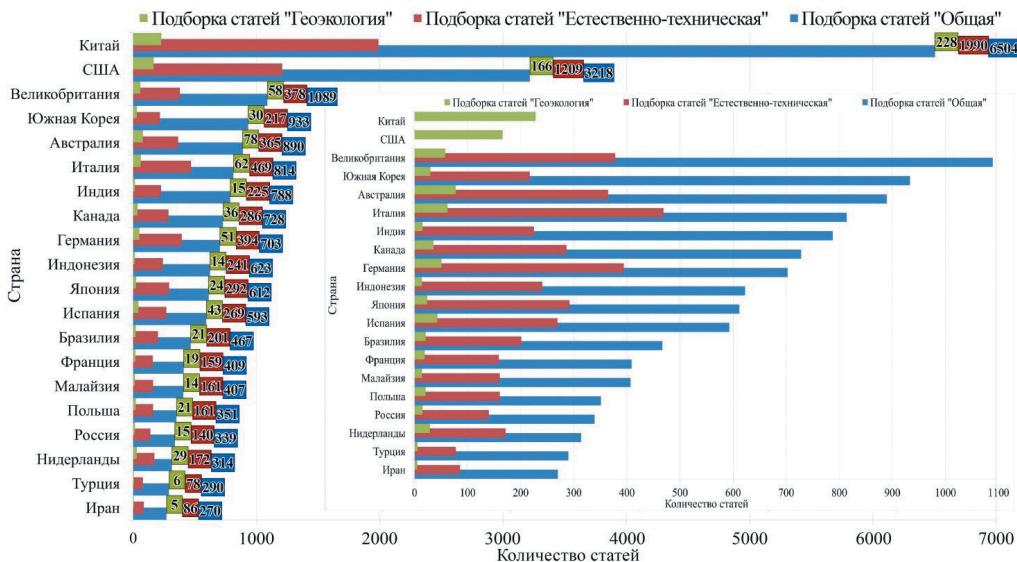


Рис. 2. Распределение количества научных статей о БПЛА по странам.

Fig. 2. Distribution of the number of scientific articles on UAVs by country.

География научных работ

Китай является безоговорочным лидером (рис. 2) по количеству опубликованных исследований в области БПЛА (6526). За последние 20 лет такие страны, как Китай и США (3215), опубликовали наибольшее число статей. При этом количество статей двух лидеров сопоставимо с количеством всех опубликованных работ из 15 стран, а доля их только экологических исследований сопоставима с количеством работ всего комплекса естественных и технических направлений остальных стран в отдельности.

Из рис. 2 видно, что соотношение между всеми исследованиями по тематике БПЛА, работами в области естественных и технических наук и тем более по экологическому направлению, неоднородно. Для большинства развитых стран (Италия, Германия, Нидерланды, Япония и др.) доля исследований по естественным и техническим наукам составляет порядка 45—55 %. В то же время в таких странах, как Республика Корея, Турция, Индия и Китай, вероятно, преобладают иные направления исследований, которые относятся к инженерии и производству, программированию и работе с искусственным интеллектом, военному делу.

Активность российских ученых в зарубежных изданиях позволяет расположить их только в середине второй десятки стран, рядом с Францией, Малайзией, Польшей и Нидерландами.

География публикаций

За последние 20 лет больше всего статей о БПЛА (1920) опубликовано журнале «Remote Sensing» («Дистанционное зондирование», Q1, пятилетний импакт-фактор: 4,9) — это международный рецензируемый журнал с открытым доступом, посвященный науке и применению технологий дистанционного зондирования, выпускающийся один раз в 2 месяца с 2009 г. С небольшим отставанием на втором месте (1710) расположился журнал «Drones» («Дроны», Q1, пятилетний импакт-фактор: 4,8) — это международный рецензируемый журнал с открытым доступом, посвященный разработке и применению дронов, в том числе БПЛА, беспилотных авиационных систем (БАС), дистанционно управляемых авиационных систем (ДУАС) и т. д. Журнал издается с 2017 г. и, вероятно, учитывая ежемесечный период издания в ближайшие несколько лет, перехватит лидерство по количеству публикаций о БПЛА. Тройку лидеров с уверенным запасом от остальных журналов замыкает журнал «Sensors» («Датчики», Q1 — CiteScore, приборостроение и Q2 — JCR, химия, аналитика, пятилетний импакт-фактор: 3,7) — это международный рецензируемый журнал с открытым доступом, посвященный науке и технологиям в области датчиков, выпускающийся один раз в 2 месяца с 2001 г. Все эти журналы индексируются в Scopus, SCIE (Web of Science), Ei Compindex, Inspec и других базах данных, относятся к издательству MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) Базель, Швейцария.

Отметим, что из первой шестерки изданий (рис. 3) журнал «Remote Sensing» является наиболее актуальным по количеству публикаций исследований в области естественных и технических наук и экологическому мониторингу окружающей среды, а серия рецензируемых научных трудов «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences» является одним из наиболее ранних изданий, где упоминаются БПЛА.

Направления исследований

Анализ «Общей» тематической подборки по параметру «область исследований» (field_of_study) показал (рис. 4 а), что из 10 наиболее крупных направлений более половины всех статей о БПЛА (56 %) посвящены технической составляющей, где рассматриваются вопросы создания, производства, программирования,

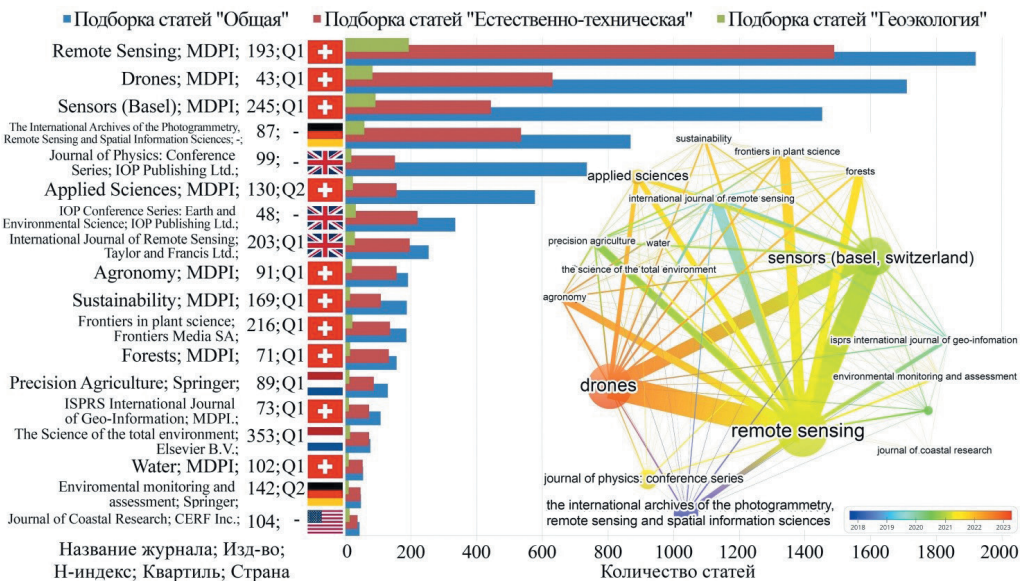


Рис. 3. Рейтинг научных журналов по количеству публикаций о БПЛА их применении.

Fig. 3. Rating of scientific journals by the number of publications on UAVs and their applications.

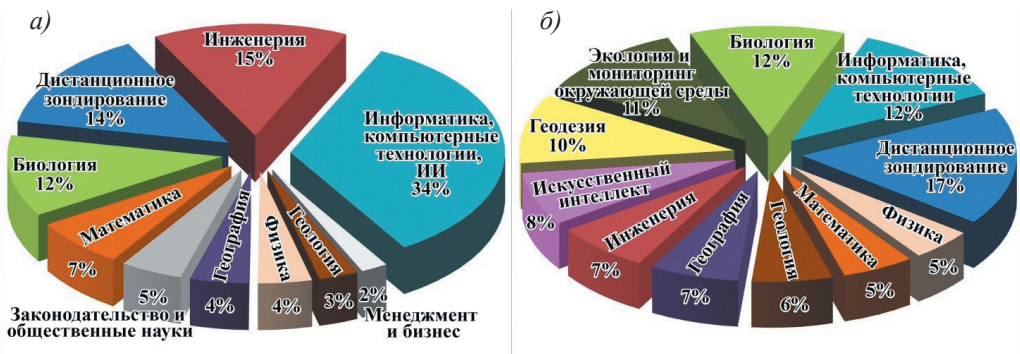


Рис. 4. Диаграммы распределения научных областей исследований о БПЛА и их применении: а — подборка «Общая», б — подборка «Естественно-техническая».

Fig. 4. Diagrams of the distribution of scientific fields of research on UAVs and their applications: а — a collection of “general”, б — a collection of “natural-technical”.

управления, а при этом еще около 7 % связаны с возможностью их внедрения, применения и реализации. Аналогичный разбор по областям исследований выполнен для «Естественно-технической» подборки (рис. 4 б). Здесь стоит отметить, что в самостоятельные блоки выделяются «Экологический мониторинг окружающей среды» и «Искусственный интеллект».

Fig. 5. A visual network based on “keywords” from the bibliographic data of scientific articles about UAVs: *a* — a collection of “general”, *b* — a collection of “geocology”.

¹ [Электронный ресурс] URL: <https://www.vosviewer.com/download> (дата обращения: 01.06.2025).

экологии, построена аналогичная сеть связей (рис. 5 б), основанная на ключевых словах из библиографических данных тематической подборки «Геоэкология».

Из рис. 5 б, учитывая цветовую гамму временного распределения публикаций и силу связей, можно выделить ряд тенденций и направлений исследований:

— последовательность тематик научных публикаций по развитию экологического мониторинга с использованием БПЛА заключается в переходе от разработки инструментария (*enviromental monitoring/instrumentation*) к разработке методов (*enviromental monitoring/method*) и непосредственно к экологическому мониторингу (*enviromental monitoring*) различных элементов геосферы (*ecosystem*) или отдельных направлений человеческой деятельности;

— наиболее применимым и изученным методом является фотограмметрия, в то время как машинное обучение и искусственный интеллект являются наиболее актуальными;

— применение БПЛА в исследованиях экосистем (*ecosystem*) в последнее время стало актуальным, вероятно, благодаря появлению и внедрению различной мультисенсорной полезной нагрузки, позволяющей комплексно подходить к мониторингу и оценке состояния природной среды, а не отдельных ее элементов по отдельности;

— основными и актуальными направлениями в исследованиях и применении БПЛА являются почвы (*soil*), биомасса (*biomass*), загрязнение воздуха (*air pollution*), качество воды (*water quality*) и точное земледелие (*precision agriculture*).

Анализ публикаций авторов

Одним из наиболее показательных критериев значимости исследователя является его цитируемость в других работах. Для общей картины также желательно учитывать и количество работ исследователя по той или иной тематике. Сквозное ранжирование авторов по показателю их цитируемости не позволяет на графике оценить вклад наиболее популярных ученых одновременно по трем рассматриваемым тематическим подборкам, поэтому при создании диаграммы (рис. 6, слева, прим. в числовом формате отображено количество опубликованных статей по тематическим подборкам) использован комбинированный подход, в котором учитывались по 15 наиболее цитируемых авторов из каждой тематической подборки. Также из предварительного перечня исключены 8 авторов по причине несовпадения их исследовательских интересов и публикаций с тематикой данной статьи (например: Anibal Ollero, Испания/США, 2566 цит. — инженерия, информатика и математика; Fabio Remondino, Италия/США, 2550 цит. — информатика, программное обеспечение и программирование и др.). В результате из 45 позиций сформировался перечень из 21 автора, представляющих 10 стран: Китай (4), Австралия (3), Великобритания (3), Германия (2), Нидерланды (2), Португалия (2), Финляндия (2), Испания (1), Сингапур (1), Швейцария (1).

Из диаграммы (рис. 6, слева) следует, что наибольший вклад в исследованиях, связанных с БПЛА в естественных и технических науках, внес австралиец Arko Lucieer. Используя выгруженные библиографические данные статей «Общей»

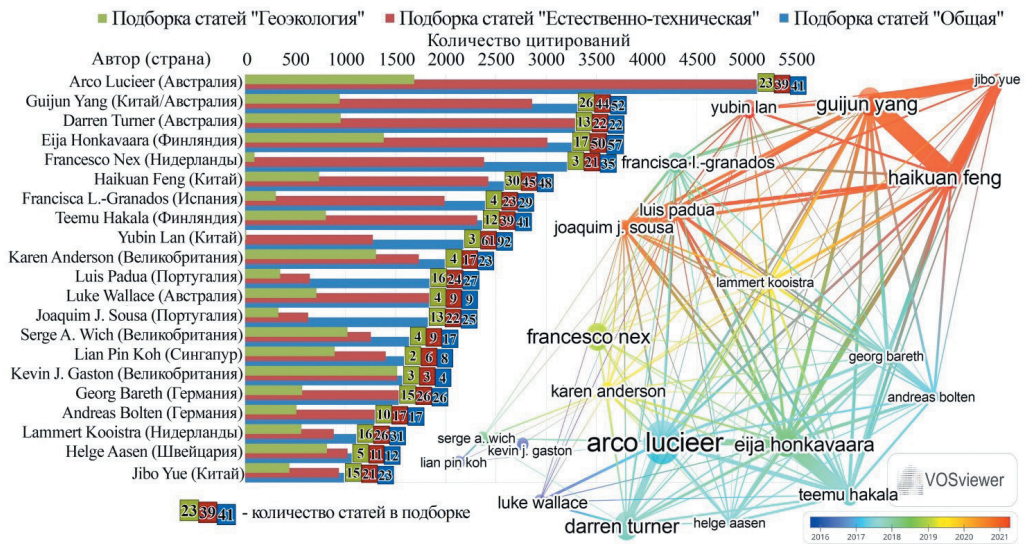


Рис. 6. Диаграмма количества цитирований зарубежных авторов по тематическим подборкам (слева) и визуальная сеть связей цитирования этих же авторов по библиографическим данным (справа).

Fig 6. Diagram of the number of citations of foreign authors by thematic collections (left) and a visual network of links between citations of the same authors by bibliographic data (right).

тематической подборки с помощью аналитических инструментов программы VOSviewer, создана визуальная сеть цитирований отмеченных выше авторов. На рис. 6 (справа) линиями представлены связи цитирования авторов, где диаметры кругов соответствуют (пропорционально) количеству ссылок на автора, толщина линии показывает плотность взаимных цитирований, близость расположения отражает сходимость области исследований, а цвет — осредненный по времени диапазон публикаций автора. Анализируя данные (рис. 6 справа), можно выделить несколько подгрупп авторов, связанных между собой по описанным выше критериям. Для большего понимания сути их исследований дана краткая характеристика научных областей и направлений исследований.

Одними из первых публиковать научные статьи о БПЛА начали австралийцы Arko Lucieer, Darren Turner и Luke Wallace. Они и научное сообщество из более 50 ученых, включая исследовательскую группу проекта «TerraLuma» во главе с Arko Lucieer¹, коллективными усилиями решают насущные проблемы экологии в концепции устойчивого развития. Их исследования [1—5] направлены на развитие технологий дистанционного зондирования по картированию биоразнообразия и оценки динамики экосистем в различных пространственных и временных масштабах. В своих работах авторы подчеркивают высокую значимость применения

¹ [Электронный ресурс] URL: <https://www.suasnews.com/2013/01/terraluma-project-to-use-headwall-photonics-hyperspectral-sensor-for-skyjib-uav/> (дата обращения: 01.06.2025).

БПЛА как связующего звена между подробными полевыми измерениями и спутниковыми наблюдениями. Высокая эффективность синергетического подхода, сочетающего эти технологии, методы, аналитику геопространственных данных и внедрение искусственного интеллекта в результате позволяет значительно расширить возможности по количественной оценке характеристик и динамике экосистем, а также улучшить понимание их структуры, состава и функций.

Исследования Eija Honkavaara и Teemu Hakala (Финляндия), Andreas Bolten и Georg Bareth (Германия) и Helge Aasen (Швейцария) сосредоточены на разработке автономных технологий для дистанционного зондирования окружающей среды, а основными сферами применения являются точное земледелие, лесное хозяйство и обеспечение безопасности [5—8]. Основной сферой интересов ученых из Китая [9, 10] (Guijun Yang, Haikuan Feng, Jibo Yue), Португалии [11] (Luis Padua, Joaquim J. Sousa) и Испании [12] (Francisca Lopez-Granados) является дистанционное зондирование в отрасли сельского и лесного хозяйства, причем их исследования посвящены оценке состояния, картографированию и моделированию роста, сегментации и вегетационному индексу сельскохозяйственных культур. Рассматриваются междисциплинарные вопросы алгоритмов обработки и оценки точности изображений, полученных с использованием RGB, NIR, мультиспектральных и гиперспектральных, тепловых и лидарных датчиков, в том числе с применением методов машинного обучения. Британцы Karen Anderson и Kevin J. Gaston проводят фундаментальные, стратегические и прикладные исследования в области экологии [13, 14], изучая видовые сообщества и факторы, определяющие их распространённость, в том числе распределение и взаимодействие видов в ночное время в условиях антропогенного воздействия (искусственное ночное освещение). Исследования Serge A. Wich (Великобритания) и Lian Pin Koh (Сингапур) носят междисциплинарный характер и направлены на сферы природоохранной биологии, землепользования, экологии и охраны окружающей среды [15], где уделяется особое внимание проблемам сохранения биоразнообразия, устойчивому развитию и экономике природных ресурсов, а БПЛА рассматриваются как высокоэффективный инструмент в решении экологических задач. Исследования голландца Francesco Nex сосредоточены на объединении элементов фотограмметрии, глубокого обучения и робототехники для разработки инновационных решений в области геоматики [16, 17].

Анализ публикаций

Для определения наиболее актуальных статей о БПЛА использованы библиографические данные всех трех тематических подборок и комбинированный подход (аналогичный выбору авторов) по ранжированию из 10 статей. В результате из 30 позиций сформировался перечень из 20 статей [1—3, 5, 11, 13—16, 18, 19—28].

Наибольшим интересом с точки зрения цитирования является обзорная статья 2013 г. о применении БПЛА в 3D-картографировании [16] Francesco Nex (Нидерл.) и Fabio Remondino (Италия/США). В статье представлен разноплановый обзор актуальных на момент публикации существующих систем беспилотных

летательных аппаратов, возможности и проблемы их применения с особым вниманием к области геоматики. Отмечен ряд экономических преимуществ, таких как относительно невысокая стоимость в сравнении с бортовыми пилотируемыми аппаратами, снижение эксплуатационных расходов и рисков при сохранении высокой точности результатов. Авторы высоко оценивают возможности вертикального взлета/посадки в ограниченном пространстве мультироторных БПЛА и охват обширных территорий БПЛА с неподвижным крылом, оперативность получения цифровых геоданных с высоким временным и пространственным разрешением даже для труднодоступных территорий или в чрезвычайных ситуациях.

К основным недостаткам авторы относят некоторые технические ограничения в отношении применимости полезной нагрузки (разрешение и дисторсии малогабаритных фотокамер, установка полноразмерных бортовых GNSS и IMU), стабильность съемки и безопасность полетов в неблагоприятных метеорологических условиях. Обсуждая невозможность прямой высокоточной привязки данных аэрофотосъемки методом «структура из движения» (structure from motion, SfM), особое внимание уделяется значимости этапа геодезических работ по измерению опорных наземных точек (GCP — ground control point). В отдельный блок выделены трудности правового и разрешительного характера, где подчеркивается отсутствие четких правил и необходимость составления запросов и получение разрешений на полеты. В заключении авторы перечисляют основные направления исследований, необходимых для решения имеющихся недостатков и дальнейшего развития применения БПЛА.

Вторая по популярности статья 2015 г. Dario Floreano (Италия/Швейцария) и Robert J. Wood (США) имеет инженерно-техническую направленность и посвящена автономному полету БПЛА [18]. В ней авторы всесторонне подходят к проблемам и возможностям проектирования и производства: гидравлика и механика, масштабирование, маневренность и эффективность, аппаратное обеспечение и вычисления, сенсорные системы, датчики и устойчивость полета, навигация, визуальное слежение за местностью и контроль приближения к препятствию, уровни автономности БПЛА, управление и контроль, стратегии посадки, стандарты сертификации летной годности воздушных судов. Отмечены как перспективы применения в гражданском секторе, так и существующие препятствия в регулировании деятельности и безопасности, законодательстве и юридических вопросах.

В обзорной статье британских ученых Karen Anderson и Kevin J. Gaston рассмотрены тематические исследования, основанные на применении БПЛА с различной полезной нагрузкой при решении основных экологических задач [13]: мониторинга экосистем и природных ресурсов в целях контроля и управления; улучшения понимания фундаментальных процессов и связей между экосистемами, биотическими и абиотическими факторами. Технологические инновации, обеспечившие рост доступности БПЛА, предоставляют исследователям новые экономически эффективные возможности для изучения экологических явлений в соответствии с необходимым пространственным и временным разрешением, недоступные ранее на основе ДДЗ космических аппаратов. Проанализированы типы и конкретные модели БПЛА и соответствующие им преимущества и недостатки

с уклоном применения в экологическом мониторинге окружающей среды. Так, малые БПЛА характеризуются доступностью приобретения готовых решений, простотой управления, возможностью полета на сверхмалых высотах и зависания в точке, однако имеют ряд технологических ограничений (время полета, грузоподъемность, точность позиционирования и зависимость от метеоусловий).

Для крупных БПЛА характерны трудности развертывания и эксплуатации в районах со сложным ландшафтом, повышенные финансовые затраты на приобретение, обслуживание и специализированный персонал. Средние беспилотные летательные аппараты (до 20 кг), по мнению авторов [13], имеют наибольший потенциал в экологических исследованиях. Рассмотрено применение различных датчиков и систем: от фото- и видеосъемки в режиме реального времени (RGB-камеры) до тепловизионных и мультиспектральных камер и др. Перечислены основные направления практического применения БПЛА: оценка биоразнообразия флоры и фауны, агрономия и точное земледелие, лесное хозяйство, геоморфология и почвоведение, метеорология, чрезвычайные ситуации природного и антропогенного характера и др. Авторы подчеркивают важность контроля и возможность проверки точности получаемой информации ДДЗ методом «структура из движения». В перспективе обсуждается использование БПЛА в качестве инструмента высокоточного картографирования для описания и моделирования среды обитания и создания местности.

Заключение

В статье представлен анализ библиографических данных зарубежных публикаций о развитии БПЛА и их внедрении в научно-практические сферы человеческой деятельности за последние два десятилетия на основе сформированных автором тематических подборок статей из электронной базы данных библиотеки LENS.ORG.

Начиная с 2012 г., прослеживается экспоненциальный рост общего количества статей о БПЛА. Наибольшее количество статей о БПЛА последние годы публикуется в международных рецензируемых журналах («Remote Sensing», «Drones», «Sensors») издательства MDPI Базель, Швейцария. Отметим, что эти журналы имеют открытый доступ, в то время как в среднем каждая третья статья о БПЛА опубликована в платных изданиях. Также журнал «Remote Sensing» является одним из наиболее актуальных изданий по вопросам применения БПЛА в геоэкологии.

По количеству опубликованных исследований в области БПЛА лидерами являются Китай и США. Для большинства развитых стран доля исследований по естественным и техническим наукам максимальна и составляет порядка 45—55 %. В развивающихся странах преобладают технологические направления исследований (инженерия, производство, программирование, военное дело). В целом количество статей естественно-технической направленности (~ 40 %) соответствует общему тренду роста, однако вопросам геоэкологии посвящается не более 5 % публикаций, а в последние два года отмечается сокращение доли статей до 2—3 %.

Анализ распределения научных областей исследований о БПЛА свидетельствует о высоком уровне мультидисциплинарности подхода при решении фундаментальных и прикладных задач, направленных на развитие технологий и методов получения геопространственных данных, их накопление, обработку и анализ. Более половины статей о БПЛА (56 %) относятся к техническим и точным наукам, где рассматриваются вопросы разработки, производства, программирования и управления; ~ 37 % статей базируются на получении и применении знаний естественных наук; ~ 7 % статей связаны с возможностью внедрения, применения и реализации БПЛА (социально-гуманитарные науки).

Анализ библиографических данных показал существенную изменчивость прикладных направлений исследований во времени, что обусловлено активным внедрением новых технологий (производственных, программных) и приборной базы. Так, например, в первое десятилетие акцент исследований падал на программное обеспечение и внедрение ГИС; в 2010-х гг. наиболее полно изучены методы фотограмметрии; в последние годы выделяются новые направления исследований, посвященные внедрению искусственного интеллекта. Также высокой значимостью и актуальностью характеризуются исследования и мониторинг экосистем и точное земледелие, что обусловило появление и внедрение различной мультисенсорной полезной нагрузки, позволяющей комплексно подходить к оценке состояния природной среды.

На основе количества публикаций и цитируемости выделены наиболее значимые исследователи, труды которых внесли существенный вклад в развитие БПЛА. Одним из первых, кто начал полноценно внедрять БПЛА и широко освещать результаты исследований, можно считать австралийца Arko Lucieer. Его исследования, как и большинства других ученых, направлены на разработку алгоритмов получения, обработки и оценки точности данных, полученных с использованием различных датчиков с БПЛА, в целях развития автономных технологий дистанционного зондирования окружающей среды в различных пространственных и временных масштабах. Основными сферами применения таких технологий являются сельское и лесное хозяйство, природоохранная биология, землепользование, охрана окружающей среды и обеспечение безопасности жизнедеятельности.

В своих публикациях исследователи, работая над совершенно разными проектами и решая различные прикладные задачи, зачастую отмечают одни и те же преимущества и недостатки применения БПЛА. Так, к несомненным плюсам авторы относят эксплуатационные характеристики (габариты, вертикальный взлет/посадка мультироторных БПЛА и охват обширных территорий БПЛА с неподвижным крылом), высокое пространственно-временное разрешение и оперативность получаемых данных, вариативность полезной нагрузки (датчиков), возможность удаленных исследований труднодоступных территорий и в условиях чрезвычайных ситуаций, а также экономическую эффективность и доступность в сравнении с бортовыми пилотируемыми аппаратами и ДДЗ космических аппаратов.

К основным недостаткам авторы относят технические ограничения в отношении применимости полноразмерной полезной нагрузки (разрешение и дилатории съемочной аппаратуры, бортовые GNSS и IMU), стабильность съемки и

безопасность полетов в неблагоприятных метеорологических условиях, а также необходимость наземных геодезических работ по опорным наземным точкам. При этом важно отметить, что существенная доля обозначенных в статье недостатков в настоящее время решена или минимизирована благодаря технологическому прогрессу, а потенциал разрабатываемых инструментов для сбора геопространственных данных не исчерпан. За последние годы датчики БПЛА [29] значительно улучшились и сегодня уже представлены как специализированные решения, а не «адаптированные варианты» наземного оборудования. Так, RGB- и мультиспектральные камеры достигли высокого уровня развития и широко используются в практических целях. Гиперспектральные камеры находятся на стадии активного развития и внедрения, а исследования ведутся в целях их облегчения и управления большими массивами спектральных данных. Существенно продвинулся уровень программного обеспечения для планирования полетов и сбора данных. Совершенствуются технологии по обеспечению стабильности навигации, передачи данных в режиме реального времени и надежности оборудования (на отказ).

В то же время, стоимость, энергопотребление и габариты по-прежнему являются основными ограничивающими факторами их применения. Так, устанавливаемая на бюджетные модели БПЛА полезная нагрузка, как правило, требует калибровки для проверки соответствия заводским характеристикам, а также проведения трудоемких наземных работ для обеспечения требуемой точности. Технологии лидарной съемки по-прежнему имеют относительно высокую стоимость и ограниченную применимость ввиду как весовых параметров, так и сложности обработки больших объемов данных при обследовании территорий большой площади.

Помимо технических и экономических ограничений во многих странах, в том числе и в России, остаются нерешенными и труднореализуемыми вопросы правового и разрешительного характера: использование воздушного пространства; регулирование отдельных видов деятельности (аэрофотосъемка); открытость и свободное использование полученных данных.

В перспективе [29—31] видится дальнейшее внедрение БПЛА и расширение использования в большинстве сфер человеческой деятельности. Это может быть обеспечено развитием методов глубокого обучения (машинное обучение с использованием многослойных нейронных сетей), новых алгоритмов автономной навигации (на основе интеграции коммуникационных технологий, метода SLAM¹, бортовых датчиков), картографирования в реальном времени (оперативное картографирование) и др.

Наиболее популярными моделями, даже имея ряд существенных технологических ограничений (время полета, грузоподъемность, точность позиционирования и зависимость от метеоусловий), вероятно, останутся малые БПЛА, что обусловлено их экономической доступностью, наличием готовых решений, компактностью и простотой управления. В то же время средние беспилотные летательные

¹ SLAM (англ. simultaneous localization and mapping — одновременная локализация и построение карты) — метод, используемый в мобильных автономных средствах для построения карты в неизвестном пространстве или для обновления карты в заранее известном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути.

аппараты (до 20 кг) имеют наибольший потенциал в модернизации и развитии, особенно в направлении экологических исследований.

References

1. Turner D., Lucieer A., Watson Ch. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing*. 2012; 4 (5): 1392—1410. DOI: 10.3390/rs4051392.
2. Lucieer A., De Jong S., Turner D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*. 2013; 38 (1): 97—116. DOI: 10.1177/0309133313515293.
3. Wallace L., Lucieer A., Malenovsky Z. et al. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*. 2016; 7 (3): 17. DOI: 10.3390/f7030062.
4. Wallace L., Lucieer A., Watson Ch. S., Turner D. Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing*. 2012; 4 (6): 1519—1543. DOI: 10.3390/rs4061519.
5. Aasen H., Honkavaara E., Lucieer A., Zarco-Tejada P. Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows. *Remote Sensing*. 2018; 10 (7): 42. DOI: 10.3390/rs10071091.
6. Nevalainen O., Honkavaara E., Tuominen S., Viljanen N. Individual Tree Detection and Classification with UAV-Based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging. *Remote Sensing*. 2017; 9 (3). DOI: 10.3390/rs9030185.
7. Viljanen N., Honkavaara E., Näsi R., Hakala T. A Novel Machine Learning Method for Estimating Biomass of Grass Swards Using a Photogrammetric Canopy Height Model, Images and Vegetation Indices Captured by a Drone. *Agriculture*. 2018; 8 (5). DOI: 10.3390/agriculture8050070.
8. Aasen H., Burkart A., Bolten A., Bareth G. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015; 108: 245—259. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002.
9. Yue J., Yang G., Tian Q., Feng H. Estimate of winter-wheat above-ground biomass based on UAV ultra-high-ground-resolution image textures and vegetation indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019; 150: 226—244. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.022.
10. Han, L., Yang, G., Dai, H. et al. Modeling maize above-ground biomass based on machine learning approaches using UAV remote-sensing data. *Plant Methods*. 2019; 15. DOI: 10.1186/s13007-019-0394-z.
11. Adão T., Hruška J., Pádua L., et al. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote Sensing*. 2017; 9 (11). DOI: 10.3390/rs9111110.
12. Torres-Sanchez J., Lopez-Granados F., Serrano N., et al. High-Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology. *PLOS ONE*. 2015; 10 (6). DOI: 10.1371/journal.pone.0130479.
13. Anderson, K., Gaston, K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013; 11 (3): 138—146. DOI: 10.1890/120150.
14. Gonzalez L., Montes G., Puig E., et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Artificial Intelligence Revolutionizing Wildlife Monitoring and Conservation. *Sensors*. 2016; 16 (1): 18. DOI: 10.3390/s16010097.
15. Koh L., Wich Serge. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical Conservation Science*. 2012; 5 (2): 121—132. DOI: 10.5167/uzh-72781.
16. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*. 2014; 6 (1): 1—15. DOI: 10.1007/s12518-013-0120-x.
17. Vetrivel A., Gerke M., Kerle N., et al. Disaster damage detection through synergistic use of deep learning and 3D point cloud features derived from very high resolution oblique aerial images, and multiple-kernel-learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018; 140: 45—59. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.03.001.

18. Floreano D., Wood R. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*. 2015; 521: 460—466. DOI: 10.1038/nature14542.
19. Tsouros D., Bibi, S., Sarigiannidis P. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*. 2019; 10 (11). DOI: 10.3390/info10110349.
20. Goerzen C., Kong Zh., Mettler B. A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2010; 57: 65—100. DOI: 10.1007/s10846-009-9383-1.
21. Otto A., Agatz N., Campbell J., et al. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*. 2018; 72 (4): 411—458. DOI: 10.1002/net.21818.
22. James M., Robson S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2014; 39 (10): 1413—1420. DOI: 10.1002/esp.3609.
23. Maes W., Steppe K. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*. 2018; 24 (2): 152—164. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.11.007.
24. Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., et al. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sensing*. 2013; 5 (12): 6880—6898. DOI: 10.3390/rs5126880.
25. Candiago S., Remondino F., De Giglio M., et al. Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*. 2015; 7 (4): 4026—4047. DOI: 10.3390/rs70404026.
26. d' Oleire-Oltmanns S., Marzolf I., Peter K., Ries J. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sensing*. 2012; 4 (11): 3390—3416. DOI: 10.3390/rs4113390.
27. Ham Y., Han K., Lin J., Golparvar-Fard M. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. *Visualization in Engineering*. 2016; 4 (1): 8. DOI: 10.1186/s40327-015-0029-z.
28. Hodgson J., Baylis, Sh., Mott R., et al. Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles. *Scientific reports*. 2016; 6: 7. DOI: 10.1038/srep22574.
29. Zhang Zh., Zhu L. A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications. *Drones*. 2023; 7 (6): 398. DOI: 10.3390/drones7060398.
30. Mohsan S.A.H., Othman N.Q.H., Yanlong L., Alsharif M.H. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*. 2023; 16: 109—137. DOI: 10.1007/s11370-022-00452-4.
31. Aleissae A.A., Amandeep Kumar A., Anwer R. M., Khan S., Hisham Cholakkal, et al. Transformers in Remote Sensing: A Survey. *Remote Sensing*. 2023; 15 (7). DOI: 10.3390/rs15071860.

Информация об авторах

Лучников Антон Игоревич, Горный институт УрО РАН, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А, ведущий инженер лаборатории проблем гидрологии суши, luchnikovanton@gmail.com.

Information about author

Luchnikov Anton Igorevich, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 78A, Sibirskaaya st., Perm, Russian Federation, leading engineer of the laboratory of problems of land hydrology.

Статья поступила 05.06.2025

Принята к печати после доработки 02.08.2025

The article was received on 05.06.2025

The article was accepted after revision on 02.08.2025