

БПЛА в геоэкологических и гидрологических исследованиях

Александр Сергеевич ФЕДОРОВСКИЙ
доктор географических наук, профессор, ведущий специалист ДВО РАН
as.fedorovskiy@mail.ru
Дальневосточное отделение РАН, Владивосток, Россия

Аннотация. Рассмотрены наиболее широко используемые в научных исследованиях приборы (датчики) для БПЛА и особенности их применения для регистрации характеристик ландшафтов. Особое внимание уделено оценке стока рек по методу «площадь – скорость», в котором площадь поперечного сечения определяется промерами глубин либо рассчитывается по известному поперечному профилю и высоте водной поверхности. Средняя скорость в поперечном сечении створа оценивается по поверхностной скорости. Обобщены исследования, в которых глубина потока, высота уровня воды и поверхностная скорость течения определяются портативными приборами, установленными на легких БПЛА. Оценка глубин водоемов и высот уровня воды часто основана на методе определения структуры объекта по отображению движения «Structure from motion – SfM» и/или методе получения стереоизображений (Multi-view stereo – MVS). Среди проблем их использования: затенение воды прибрежной растительностью, солнечные блики, изменение освещенности во время полета, а также рефракция лучей. Измерение глубин может быть выполнено также лидарами и георадарами, установленными на БПЛА. Приобретает большую популярность использование портативных эхолотов, привязанных к БПЛА. Высота уровня воды, кроме оптических методов, может быть оценена установленными на БПЛА радиорадарами, акустическими и лазерными высотомерами путем вычитания расстояния, измеренного этими приборами до воды, из высотной отметки, полученной бортовым приемником GNSS. Для оценки поверхностной скорости течения воды рек по изображениям наиболее часто применяются шесть методов: LSPIV, STIV, KLT-IV, PTV, LSPTV и OTV. Установлено, что в методах LSPIV, LSPTV и OTV требуются уделять большое внимание правильному выбору соответствующих параметров, в то время как в KLT-IV и SSIV рабочий процесс более автоматизирован. Отмечен ряд ограничений применения легких БПЛА, которые могут затруднить полеты и измерения. Среди них сильный ветер, дождь, снег и другие. Необходима разработка компактных средств измерений параметров окружающей среды на существующих и новых принципах, а также грузоподъемных, ударопрочных, водонепроницаемых БПЛА, которые могут летать автономно, используя возможности машинного зрения и искусственного интеллекта, в том числе в неблагоприятных метеорологических условиях.

Ключевые слова: речной сток, расход воды, БПЛА, дистанционное зондирование

Для цитирования: Федоровский А.С. БПЛА в геоэкологических и гидрологических исследованиях // Тихоокеанская география. 2026. № 1. С. 68–82. https://doi.org/10.35735/26870509_2026_25_5.

Drones in geocological and hydrological researches

Alexander S. FEDOROVSKIY

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Leading Specialist

as.fedorovskiy@mail.ru

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Abstract. This study assessed the most widely used UAV's sensors and their application in landscape characterization. Particular attention is paid to river runoff assessment using the area-velocity method, in which the cross-sectional area is determined by depth measurements or calculated from a known cross-sectional profile and water level elevation. The average velocity in the cross-sectional area is estimated from the surface velocity. Studies in which stream depth, water level, and surface current velocity are determined using portable instruments mounted on lightweight UAVs, are summarized. Estimation of the depths and heights of the water level is often based on the Structure from Motion (SfM) and/or Multi-View Stereo (MVS) methods. Challenges associated with these methods include water shading by coastal vegetation, solar glare, changes in illumination during flight, and light refraction. Depth measurements can also be performed using LiDAR and ground-penetrating radars (GPR) mounted on UAVs. It is becoming increasingly popular the use of portable «tethered» echo sounders which is kept in contact with the water surface, but controlled by the UAV. In addition to optical methods, water level elevation can be estimated using UAV-mounted radars, acoustic altimeters, and laser altimeters by subtracting the distance measured by these devices from the elevation obtained by the on-board GNSS receiver. Six methods are most commonly used to estimate river surface current velocity from imagery: LSPIV, STIV, KLT-IV, PTV, LSPTV, and OTV. It has been established that LSPIV, LSPTV, and OTV require careful selection of the appropriate parameters, while KLT-IV and SSIV employ a more automated workflow. A number of limitations of using lightweight UAVs have been noted, which can complicate flights and measurements. Among them are strong wind, rain, snow and others. There is a need to develop compact sensors based on existing and new principles, as well as load-bearing, shock-resistant, and waterproof UAVs that can fly autonomously, using machine vision and artificial intelligence, including in adverse weather conditions.

Keywords: hydrology, surface velocities, discharge, drones, image velocimetry

For citation: Fedorovskiy A.S. Drones in geocological and hydrological researches. *Pacific Geography*. 2026; (1):68-82. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2026_25_5.

Введение

Спутниковые технологии традиционно применяются для геоэкологических и гидрологических исследований, планирования природопользования и других задач [1, 2], в том числе на Дальнем Востоке [3–8]. Между тем, несмотря на возможности спутниковых технологий, во всем мире наблюдается бурный рост использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), часто называемых беспилотниками или дронами [9–12]. Доступ к спутниковым снимкам высокого и сверхвысокого пространственного разрешения бывает ограничен, часто отсутствуют снимки на конкретную дату или нужные области закрыты облачностью, кроме того, качество изображений страдает из-за влияния атмосферы и других факторов. Съемки с БПЛА не имеют подобных ограничений. Зачастую они более доступны, рентабельны и оперативны, чем традиционные спутниковые методы, а последние достижения в конструировании дронов, создании мощных источников питания двигателей, компактных датчиков (сенсоров), применении методов машинного зрения и искусственного интеллекта способствуют быстрым инновациям в их использо-

вании. БПЛА обеспечивают уникальную платформу для сбора полевых материалов между точечным масштабом (наземными станциями) и региональным (спутниковыми данными), существенно дополняя и расширяя горизонты применения традиционных методов. Уникальные возможности точных измерений характеристик природных объектов, параметров сооружений с помощью дронов позволяют говорить о возникновении нового направления в дистанционном зондировании окружающей природной среды – дронометрии [10]. Между тем в отечественной практике пока преобладают отдельные «опыты применения», в то время как требуется разработка промышленных стандартов использования БПЛА в научных исследованиях как в части их конструкций и приборного оснащения, так и в части методик эффективного применения, включая вопросы безопасности. Цель представленного обзора – рассмотреть наиболее успешный опыт применения легких БПЛА в изучении окружающей среды, сосредоточив особое внимание на водных объектах (оценке глубин водоемов, высоты водной поверхности, скорости течения и других характеристик).

Материалы и методы

Обзор построен на материалах публикаций в ведущих отечественных¹ и зарубежных² журналах, в сборниках трудов и материалах специализированных конференций, к которым есть доступ в сети Интернет, за последние 10 лет. Осуществлен поиск по всей БД eLIBRARY.RU, а также в сети Интернет по ключевым словам: «Беспилотный летательный аппарат», «БЛА», «БПЛА», «Дрон» и другим. Из внушительного списка отобрано и проанализировано только 79 публикаций, наиболее современных и соответствующих теме исследования, главным образом из-за невозможности разместить все материалы в одной статье. По этой же причине анализ дан в сугубо конспективной форме без формул, таблиц (кроме одной) и рисунков с надеждой, что заинтересованный читатель обратится непосредственно к оригинальным публикациям.

Методы получения сведений о земной поверхности с помощью БПЛА, как и спутниковых систем, определяются регистрирующими приборами (датчиками) с той лишь разницей, что носитель редко поднимается на большую высоту, поэтому достаточно качественные материалы могут быть получены относительно менее дорогостоящим оборудованием [11, 12]. Обсуждение конструкции БПЛА, вопросов навигации и управления не входит в задачи настоящего исследования, отметим только, что в работе рассматриваются часто применяемые в научных исследованиях легкие многороторные системы и аппараты с неподвижным (чаще треугольным) крылом. Первые обычно используют четыре (квадрокоптер), шесть (гексакоптер) или восемь (октокоптер) двигателей с пропеллерами; управление аппаратами осуществляется увеличением или уменьшением скорости их вращения. Вторые приводятся в движение одним или несколькими двигателями с пропеллерами в толкающей или тянущей конфигурации. Летная эффективность этих конструкций обычно выше, чем у многороторных из-за их меньшего относительного веса и того, что подъемная сила формируется за счет поверхности крыла [11, 12].

На БПЛА устанавливают компактные бытовые, реже профессиональные цифровые фотокамеры, мультиспектральные, гиперспектральные, тепловые и микроволновые камеры, а в последнее время лазерные сканеры (лидары), радиометры и георадары. Характеристики и области применения некоторых используемых в геоэкологических и гидрологических исследованиях датчиков (сенсоров) БПЛА приведены в таблице.

¹ Вестник ДВО РАН, Вестник МГУ серия 5. География, Водные ресурсы, География и природные ресурсы, Геопрофи, Известия РАН. Серия географическая, Тр. ГГО, Тр. ГМЦ (Гидрометеорологические исследования и прогнозы), Тр. ДВНИГМИ, Тр. СибНИГМИ, Метеорология и гидрология, Тихоокеанская география, Водное хозяйство России.

² Compag, Drones, Earth Syst. Sci. Data, EPA Res. Report, Frontiers in Water, Geoscientific Model Development, HESS, Hydrol Earth Syst. Sci., J. Hydrology, JAMES, Remote Sensing, Sensors, Water, Water Resour. Res.

Краткие характеристики и области применения датчиков (сенсоров) БПЛА
(по: [11, 12], с дополнениями автора)

Table 1. Brief characteristics and fields of application of UAV's sensors

Тип камеры	Спектральный диапазон, длины волн, мкм ¹	Примеры камер	Некоторые области применения
Цифровые (RGB)	Видимый: 0.38–0.78 (красный, R: 0.6–0.78; зеленый, G: 0.5–0.6; синий, B: 0.38–0.5)	Sony NEX (APS-C), Sony α 7R (FF), Canon Power-shot S110, GoPro Hero 4, Nikon, Zemmuse-X7, X5S, X4S	ЦМР; мониторинг затоплений, снежного покрова, ледовых явлений; оценка глубин водоемов, высот уровня воды, скоростей течения рек и качества вод
Лидары (Lidar – Light detection and ranging)	Видимый и инфракрасный (ИК): 0.5–2.0	Zenmuse L1, RTL-400 Redtail, HDL-32E, ASTRALiTE EDGE	Батиметрические (зеленые) – глубина водоемов; ИК – ЦМР, высота растительности
Мультиспектральные (МС)	Видимый, RedEdge ² , ближний инфракрасный (NIR): 0.38–1.0	MicaSense, MicaSense RedEdge-MX, Parrot Sequoia+	Аналогично RGB камерам, а также: мониторинг растительности, транспирации, влажности почвы, выходов подземных вод
Гиперспектральные (ГС)	Видимый и дальний инфракрасный (LWIR): 0.38–2.5	Micro-Hyperspec, Rikola Hyperspectral, FirefLYE V185, HySpec VNIR, AvaSpec-dual, Nano-Hyperspec, Ocean Optics STS-VIS	Аналогично МС-камерам, а также: оценка гидрохимических характеристик вод; мониторинг вредоносного цветения водорослей (ВЦВ); картирование переувлажненных территорий
Тепловые инфракрасные (ИК), тепловизоры	Длинноволновый (TIR): 7.5–13.5	Zenmuse XT S, FLIR Vue Pro R, FLIR Duo Pro R, FLIR Boson LWIR, Optris PI 400i	Оценка температур поверхности ландшафтов, суммарного испарения, влажности почв; мониторинг ВЦВ, притока подземных вод
Радиометры (пассивные)	Микроволновый (MW): 1 мм–1 м	Black Swift Technologies L-band radiometer	Мониторинг затоплений, влажности почв, снежного покрова; оценка глубин водоемов, высот уровня воды
Георадары (GPR) (активные)	Микроволновый (MW): 115 мм–30 м	SPG series Geoscanners (SPG 1800, 1600, 1700 и др.), Cobra Plug-in SE-150	Оценка свойств почв, мощности снежного покрова, глубин водоемов, высот уровня подземных вод

¹ Длины электромагнитных волн (в системе СИ) обычно представляются в производных метра (м): микрометрах (мкм) = 1×10^{-6} м или в нанометрах (нм) = 1×10^{-9} м;

² RedEdge (граничный красный) – обозначение длины волны, при использовании которой хорошо видна зеленая растительность.

Цифровые фотокамеры формируют изображения (фотоснимки) в видимой области электромагнитного спектра с тремя значениями для каждого пикселя: красным (R), зеленым (G) и синим (B). Многие БПЛА поставляются со встроенными RGB-камерами. Лидары – это приборы (сканеры), излучающие электромагнитные волны оптического и инфракрасного диапазона. Для дронов разработаны компактные облегченные лидары (см. табл.). Мультиспектральные (МС) камеры позволяют получать изображения объектов в видимой и ближней инфракрасной (NIR) области. Изображения часто имеют более низкое разрешение по сравнению с фотокамерами, а также спектральные и радиометрические искажения, поэтому они поставляются с системами радиометрической калибровки. Обработка МС-изображений более сложна, чем обычных RGB-снимков [13]. Выпускаются БПЛА со встроенными МС-камерами. Гиперспектральные (ГС) камеры более высоки по стоимости, чем МС-камеры, но имеют большое число каналов (bands) и очень высокое спектральное разрешение (5–10 нм), способны регистрировать изображения объектов от видимой до дальней (тепловой) инфракрасной TIR-области. У всех камер, установленных на БПЛА, есть большое преимущество по сравнению со спутниковыми из-за отсутствия необходимости коррекции атмосферного воздействия благодаря малой высоте полета, что существенно облегчает калибровку с использованием эталонов и полевой радиометрии.

Тем не менее некоторые факторы окружающей среды, такие как высота Солнца, тени или относительно высокое соотношение сигнал / шум, заставляют применять поправки во время обработки изображений. В обзоре [14] рассмотрены вопросы использования гиперспектральных датчиков на БПЛА, в том числе создание камеры из доступных комплектующих [15]. Тепловые камеры, которые часто называются тепловизорами, получают изображение, собирая инфракрасное излучение, исходящее от почвы, растительности и других объектов, интенсивность которого зависит от температуры их поверхности. Существуют камеры с охлаждаемыми и неохлаждаемыми матрицами. Охлаждаемые матрицы, используемые в спутниковых системах, регистрируют короткие и средние волны ИК-диапазона, обеспечивают высокие разрешение и тепловую чувствительность. Приборы с неохлаждаемыми матрицами работают в ИК-диапазоне (7.5–13.5 мкм), они легче и дешевле, что делает их пригодными для установки на БПЛА. Пространственное разрешение таких камер часто не превышает 640×512 пикселей, они менее термочувствительны, чем охлаждаемые датчики, и медленнее реагируют на изменения температуры, имеют температурный дрейф на протяжении полета, поскольку корпус камеры либо нагревается, либо охлаждается, что требует введения поправок. Процессы сбора и предварительной обработки данных, радиометрическая калибровка рассмотрены в работах [16–19]. В микроволновом диапазоне применяются пассивные и активные камеры. Пассивные камеры (радиометры) регистрируют естественное тепловое излучение земной поверхности (или яркостную температуру) на длинах волн микроволнового диапазона [20]. К активным микроволновым приборам относят георадары (GPR), которые предназначены для применения на поверхности земли. При установке на БПЛА полет обычно ограничивается высотой в нескольких метрах над зондируемой поверхностью [10].

Результаты и их обсуждение

Геоэкологические исследования

Цифровые изображения (фотоснимки), полученные с применением метрических камер высокого разрешения на БПЛА и высокоточного GNSS позиционирования, наиболее широко применяются в решении топографических задач. Здесь требования к оборудованию, в том числе беспилотным воздушным судам (БВС), и съемочному процессу доведены до промышленного стандарта [21]. В геоэкологических исследованиях, в которых часто не требуется геодезическая точность съемки, применяются бытовые цифровые камеры для оценки разливов рек и озер, размеров водных объектов [22], картирования пойм рек [23, 24] и аналогичных целей.

Качество природных вод достаточно хорошо оценивается МС камерами. Так, снимки, выполненные с помощью камер MicaSense RedEdge-MX, Parrot Sequoia+ и других, используются для оценки концентрации взвешенных в воде наносов [25, 26], мониторинга вредоносного цветения водорослей [27]. Обработка МС-изображений более сложна, чем обычных RGB-снимков [28]. В последнее время применяются многоканальные ГС камеры [29], например, Nano-Hyperspec и AvaSpec-dual (640 каналов) для оценки качества вод [30, 31], мониторинга вредоносного цветения водорослей [32, 33]. Качество природной среды тесно связано с температурным и влажностным режимом. С помощью тепловых камер (тепловизоров), например, Zenmuse XT S, FLIR Vue Pro R, FLIR Duo Pro R и других регистрируется влажность почвы [34], границы водных объектов [35]. Содержание влаги в почве также успешно регистрируется в микроволновом диапазоне частот. Пассивные камеры (радиометры) регистрируют естественное тепловое излучение земной поверхности (или яркостную температуру) на длинах волн микроволнового диапазона, которая зависит от диэлектрической проницаемости, угла обзора и поляризации. Поскольку диэлектрические постоянные воды (~80) и частиц почвы (~6) существенно различаются, содержание влаги в почве влияет на яркостную температуру. Такими камерами оснащают в основном спутниковые системы.

По сравнению со спутниками, камеры БПЛА, например BST L-band radiometer, в этом диапазоне могут достигать значительно более высокого пространственного разрешения в задачах картирования запасов влаги в почве [36]. Относительно новым направлением является использование активных микроволновых георадаров (GPR) на БПЛА для оценки свойств почвенного покрова (мощность почвенных горизонтов, гранулометрический состав, влажность), измерения высоты снежного покрова и толщины льда водоемов, глубин залегания подземных вод. С их помощью выполняют промеры глубин водоемов, в том числе и по льду [10].

Гидрологические исследования

Более подробно остановимся на проблеме дистанционного измерения расходов воды в реках, которые необходимы как для оценки водных ресурсов, борьбы с затоплением территорий и других гидрологических задач, так и для геоморфологических и экологических исследований. Дистанционные методы оценки расхода воды Q в реке основаны на формуле $Q = \omega V_{\text{cp}}$ (так называемой метод «площадь – скорость»), в которой площадь поперечного сечения ω определяется промерами глубин либо рассчитывается по известному поперечному профилю гидрометрического створа и высоте уровня воды. Средняя скорость течения в поперечном сечении створа V_{cp} рассчитывается по поверхностной скорости или по формуле Шези (Манинга).

Глубина. Оптические (фотограмметрические) методы оценки глубин рек с использованием легких БПЛА (методы «Structure from motion – SfM» и «Multi-view stereo – MVS») получили широкое распространение по всему миру [37–39]. Вместе в тем исследователи отмечают ряд проблем их применения. Наиболее часто они связаны со снижением качества RGB-фотографий из-за солнечных бликов на воде и изменения освещенности во время полета [40]. Лучшие результаты в этом отношении могут дать МС- и ГС-снимки, однако их разрешение ниже, чем RGB-фотографий, что существенно снижает точность методов [41, 42]. Другая сложная проблема связана с рефракцией лучей – преломлением света на границе раздела «воздух – вода», из-за чего оцененная по снимкам глубина получается меньше реальной. Так, в работе [43] количественно оценили рельеф дна реки с глубинами до 0.70 м. Средние ошибки находились в диапазоне 1.6–8.9 см, но были значительно уменьшены после применения поправки на рефракцию. В статье [44] предложен многокамерный метод коррекции рефракции для снимков, полученных вне надира (отвесной линии). Оценки глубин до 1.5 м показали точность около 0.1 % от высоты полета. В [45] рассмотрено применение съемок с БПЛА и метода SfM для измерения глубин водных объектов и подчеркнута необходимость автоматизированных процедур для коррекции рефракции. Вопросу такой коррекции уделяется внимание в упомянутой ранее работе [43]. В статье [46] представлен метод уменьшения влияния отражения от водной поверхности, основанный на регистрации двойной последовательности изображений. Установлено, что методы SfM и MVS чувствительны к мутности потока, цвету воды и глубине, при этом средние ошибки заметно увеличивались на глубинах более 1 м.

Измерение глубин может быть выполнено также лидарами, излучающими в области частот видимого зеленого спектра. Применение компактного «зеленого» гидрографического лидара Riegl VQ-840-G, излучающего импульсы с длиной волны 0.532 мкм и предназначенного для установки на БПЛА, показано в [47]. Система была протестирована в пресноводных прудах глубиной 5–6 м с илистым дном. Лидар ASTRALiTe Edge, примененный в работе [48], позволил выполнить промеры, в 1–1.5 раза превышающие глубину, при которой еще виден стандартный белый диск (Секки). Эффективность спутниковой МС-съемки и ГС-изображений с пилотируемых самолетов и БПЛА, а также «зеленого» лидара для промеров глубин оценена на реке со средней глубиной 1.8 м. Лидарные измерения обеспечивали наибольшую точность, однако максимальная глубина проникновения

лазерного излучения и отражение лучей от дна стали важным ограничением на глубинах более 2 м. Положительный опыт оценки глубин водоемов получен при использовании георадаров [49].

Большие перспективы показали оценки глубин озера и рек с помощью привязанного к легкому БПЛА эхолота [50]. В работе [51] рассмотрено применение небольшого дрона, приводившего в движение мини-лодку с эхолотом, для исследования глубоких участков и фотосъемки с последующей обработкой снимков методом SfM для охвата более мелких участков, видимых с БПЛА, но не доступных для эхолота.

Таким образом, положительный опыт оценок глубин и картирования рельефа дна небольших рек, озер и водохранилищ доказывает, что съемки высокого разрешения с БПЛА более эффективны, чем традиционные методы, они дают уникальный материал для гидрологических целей, геоморфологических исследований и гидравлического моделирования.

Высота уровня воды. Измерение высоты уровня воды традиционно выполняется с помощью водомерных реек и других наземных приборов, а также со спутников [1, 2, 52]. Возможности БПЛА в этом вопросе продемонстрированы в работе [53], в которой описано определение уровня воды у плотины водохранилища с помощью комбинации RGB-изображений, полученных с БПЛА, и оптических методов, основанных на наземных контрольных точках. В [54] также показано, как наблюдали уровни воды в реке, комбинируя аналогично полученные RGB-изображения и алгоритмы SfM для создания ортофотопланов, но уже без использования наземных контрольных точек. Разработана целая технология оценки уровня воды по снимкам с БПЛА в нижнем бьефе плотины гидроэлектростанции в Китае, причем интересующие области были выделены на изображениях автоматически. Взаимосвязь между размером пикселей изображения и фактическим пространственным масштабом, реальной высотой и колебаниями водной поверхности, а также максимальным, средним и минимальным уровнями воды была получена с использованием калибровки [55]. Интересная методическая работа выполнена авторами статьи [56]. Они сопоставили возможности оценки уровня воды радиолокатором (радаром), акустическим высотомером и лазерным дальномером, установленным на БПЛА. Уровень водной поверхности рассчитывался путем вычитания расстояния, измеренного этими приборами до воды, из высотной отметки, полученной бортовым приемником GNSS. Радар показал лучшие результаты с точки зрения точности (0.5 % дальности) и максимальной высоты полета (60 м), тогда как акустический высотомер больше подходил для стабильной и малой высоты полета. Лазерная система оказалась полезной для узких полей зрения (особенно при затенении воды растительностью). Эти исследования показали, что измерения уровня воды, полученные с помощью дальномеров и приемников GNSS, могут обеспечить большую точность, чем космическая или воздушная высотометрия. В более поздней своей работе [57] авторы оценили высоту водной поверхности в небольших ручьях (шириной 1–2 м) с растительностью, используя радиолокационный высотомер на базе дрона с полным анализом формы сигнала, которая была на порядок лучше, чем полученная с помощью лидара или фотограмметрии. На основе аналогичного подхода разработан радиолокационный высотомер на базе БПЛА для картирования пространственного распределения высоты водной поверхности в небольшом ручье с растительностью и оценки параметров шероховатости для калибровки гидродинамических моделей. Высотомер обеспечивал измерение высоты водной поверхности с точностью 3 см и пространственным разрешением 0.5 м, что помогло авторам выявить значительные изменения коэффициентов гидравлической шероховатости [58].

Средняя скорость течения реки. Распространены несколько подходов к оценке этой характеристики. Наиболее распространенный основан на связи средней скорости течения воды с поверхностной скоростью, которую можно измерить дистанционно [59, 60]. Широко используется вероятностный подход и расчеты по формуле Шези (Манинга) [61].

Поверхностная скорость. Внедрены в практику различные методы ее мониторинга, включая использование переносных [60] и стационарных [62] радаров, в том числе уста-

новленных на БПЛА [63]. В начале 60-х годов прошлого века в нашей стране были детально разработаны методики оценки расхода воды на основе измерения поверхностной скорости течения рек путем фотографирования с самолета плавающих объектов: льдин или специально сброшенных поплавков с красителем. БПЛА дали новый импульс применению этого подхода. Развитию оптического направления способствовал детально разработанный лабораторный метод исследования скорости течения, известный под названием «Оценка скорости движения по изображениям частиц» (Particle image velocimetry – PIV) [64]. В полевом варианте этого метода поверхностная скорость течения устанавливается по серии фотографий (или видеосъемки) водной поверхности с плавающими искусственными или естественными объектами, смещающимися вниз по течению, и автоматизированной обработкой изображений. Наиболее часто применяются следующие методы оценки поверхностной скорости течения воды: LSPIV, STIV, KLT-IV, PTV, LSPTV и OTV. Одним из первых был разработан метод LSPIV [65]. Он основан на концепции объекта (particle) – группы пикселей на изображении, представляющих либо реальный объект, либо узор на воде (рябь, следы вихрей и т. п.), положение которого можно отслеживать по последовательности изображений с использованием корреляционных методов [66]. На его основе разработан второй подход, результатом которого стал усовершенствованный метод STIV, работающий быстрее, поскольку отслеживание выполняется не по площади, а по профилям – линиям вдоль основного направления потока [67]. Третий подход основан на анализе оптического потока с помощью алгоритмов компьютерного зрения. Одна из его версий базируется на так называемом подходе Лукаса-Канаде (KLT-IV или KLT). Современная реализация метода KLT-IV основана на минимизации различий в значениях оттенков серого цвета между шаблоном и областью поиска путем адаптации параметров аффинного преобразования в рамках процедуры оптимизации [68, 69]. В методе LSPTV вместо использования областей в качестве шаблонов, как в LSPIV, сначала обнаруживаются отдельные частицы, а затем их ищут на последующих изображениях. PTV – это вариант отслеживания объектов, в котором используются методы корреляции, как в LSPIV. Метод SSIV – дальнейшее развитие LSPIV, также использующий корреляцию для вычисления скорости поверхностного потока. Он позволяет снижать влияние теней и бликов света на изображении на оценку скорости течения и требования к плотности засева поверхности потока. В методе используется калиброванная камера для исправления геометрических искажений изображений [70]. Метод OTV использует автоматическое обнаружение объектов на поверхности воды и отслеживание с помощью алгоритма Лукаса-Канаде [71] с последующей фильтрацией, позволяющей сохранить только реальные траектории движения объектов, требует минимального ввода данных о направлении потока и ориентации камеры [72].

Метод LSPIV является наиболее широко используемым, однако он может занижать скорости, что подробно показано авторами [73], которые вместо него предпочитают PTV. В большой методической работе [74] выполнено сравнение методов LSPIV, LSPTV, KLT-IV, OTV и SSIV в условиях низких скоростей течения (около 0.12 м/с). Отмечено, что LSPIV, LSPTV и OTV потребовали больших усилий для правильного выбора соответствующих параметров, тогда как в KLT-IV и SSIV рабочий процесс более автоматизирован. В целом отклонения оцененных этими методами скоростей течения от стандартных гидрометрических измерений находились в пределах 0.05 м/с.

Оценка скоростей течения и речного стока оптическим методом выполняется на гидрометрических постах стационарными камерами и мобильными камерами на БПЛА. Так, в университете Кобэ (Япония) разработана система наблюдений за поверхностной скоростью по методу STIV при оценке расхода воды в реке. Система получила название KU-STIV (Kobe university space-time image velocimetry). Скорость потока вычисляется по времени, в течение которого рябь на водной поверхности или плавающие предметы переместятся вдоль реки. Поверхностные скорости и расходы воды, оцененные этой системой, находятся в хорошем соответствии с данными стандартных ручных измерений [65, 67].

Оценки скорости течения воды с помощью фотокамеры, установленной на БПЛА, также получили большое развитие. Например, система KU-STIV эффективно работает как со стационарными камерами, так и с мобильными на дронах [67]. В работе [75] авторы сравнили результаты расчета поверхностных скоростей течения по изображениям, полученным с БПЛА, методами: LSPIV, LSPTV и STIV. Хотя они показали схожие результаты, авторы указывают на необходимость дальнейшего совершенствования этих подходов. В работах [76, 77] измеряли поверхностные скорости течения небольших рек с применением метода LSPIV. Авторы использовали подвес для обеспечения вертикального положения оптической оси объектива камеры, что позволило исключить необходимость удаления искажений в изображениях. В [78] получили удовлетворительные результаты сравнения расходов воды, оцененных методом LSPIV по изображениям с БПЛА, с береговой стационарной камеры, акустическим профилометром и вертушкой. В исследовании [79] объединили съемки с БПЛА и спутников Gaofen-2, SPOT-5 и Sentinel-2 для оценки параметров формулы Манинга и получили точные значения расходов воды на 24 реках на Тибетском нагорье на протяжении длительного периода времени.

Заключение и выводы

БПЛА в качестве платформ геоэкологического и гидрологического мониторинга существенно дополняют традиционные спутниковые и наземные наблюдения, они более доступны, рентабельны и оперативны, чем традиционные методы, это открывает новые возможности для оценки характеристик земной поверхности, достижения пространственно-временного разрешения, необходимого для более глубокого понимания и прогнозирования природных процессов. Вместе с тем применение легких БПЛА имеет ряд ограничений и проблем. Среди наиболее очевидных – погодные условия, такие как сильный ветер, дождь, снег, которые могут затруднить полеты. Солнечные блики, затенение водной поверхности растительностью могут ухудшить качество изображений, что ведет к необходимости применения более дорогих средств измерений и разработки алгоритмов коррекции, специфичных для полета и условий окружающей среды. Обеспечение требуемой точности в определении положения аппарата и выравнивание изображений, в особенности над водной поверхностью, невозможность летать автономно без GPS представляет собой еще один проблемный аспект. Низкая грузоподъемность, ограничивающая количество оборудования на платформе, короткое время полета также требуют новых технологических инноваций. Многие рассмотренные здесь статьи отражают необходимость увеличения исследовательских усилий и получения большего опыта применения БПЛА в гидрологии и геоэкологии. Необходимо проведение фундаментальных и прикладных исследований для разработки компактных средств измерений глубин водоемов, высот водной поверхности, скоростей течения или непосредственно расходов воды в реках на основе лазерных, радиолокационных и других технологий. Актуальна разработка ударопрочных, водонепроницаемых БПЛА, которые могут летать автономно, используя возможности машинного зрения и искусственного интеллекта, в том числе в неблагоприятных метеорологических условиях.

Литература

1. Виноградов Б.В., Кондратьев К.Я. Космические методы земледения. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 190 с.
2. McCabe M.F., Rodell M., Alsdorf D.E., Miralles D.G., Uijlenhoet R., Wagner W., Lucieer A., Houborg R., Verhoest N.E.C., Franz T.E., Shi J., Gao H., Wood E.F. The future of earth observation in hydrology // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. Vol. 21(7). P. 3879–3914.
3. Ганзей С.С., Ермошин В.В., Мишина Н.В., Ширанова Т. Современное использование земель в бассейне Амура // *География и природные ресурсы.* 2007. № 2. С. 17–25.
4. Бакланов П.Я., Ганзей С.С. Трансграничные территории: проблемы устойчивого природопользования. Владивосток: Дальнаука, 2008. 215 с.

5. Ермошин В.В., Ганзей С.С., Мишина Н.В. Информационное обеспечение геоэкономических исследований в бассейне р. Амур // *Вестн. ДВО РАН*. 2010. № 1. С. 107–113.
6. Алексанин А.И., Краснопеев С.М., Морозов М.А., Фомин Е.В. Совмещение изображений с российских спутников «Ресурс-П» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 1. С. 18–28.
7. Егидарев Е.Г., Горбатенко Л.В., Тоняткин Д.Г. Оценка зоны затопления поймы реки Амур в 2013 г. на основе данных космического мониторинга // *Вестн. ДВО РАН*. 2021. № 6. С. 56–64.
8. Неров И.О., Краснопеев С.М., Бугаец А.Н., Беликов В.В., Глотко А.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Кролевецкая Ю.В. Опыт создания цифровой модели рельефа для гидродинамических расчетов в бассейне р. Амур // *Вестн. ДВО РАН*. 2021 № 6. С. 45–56.
9. Плюснин В.М., Макаров С.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В. Всероссийская научно-практическая конференция «Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях» // *География и природные ресурсы*. 2018. № 4. С. 195–196.
10. Федоровский А.С. Новые возможности исследования рек с помощью БПЛА // *Сб. науч. статей «Физика геосфера»*. Вып. 2. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2020. С. 177–191.
11. Acharya B.S., Bhandari M., Bandini F., Pizarro A., Perks M. et al. Unmanned aerial vehicles in hydrology and water management: applications challenges and perspectives // *Water Resour. Res.* 2021. Vol. 57. e2021WR029925.
12. Vélez-Nicolás M., García-López S., Barbero L., Ruiz-Ortiz V., Sánchez-Bellón Á. Applications of unmanned aerial systems (UASs) in hydrology: a review // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. 1359.
13. Yao H., Qin R., Chen X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications – a review // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 1443.
14. Adão T., Hruška J., Pádua L., Bessa J., Peres E., Morais R., Sousa J.J. Hyperspectral imaging: a review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry // *Remote Sens.* 2017. Vol. 9. 1110.
15. Mao Y., Betters C.H., Evans B., Artlett C.P., Leon-Saval S.G., Garske S., Cairns I.H., Cocks T., Winter R., Dell T. Open HSI: a complete open-source hyperspectral imaging solution for everyone // *Remote Sens.* 2022. Vol. 14. 2244.
16. Mesas-Carrascosa F.-J., Pérez-Porras F., De Larriva J.E.M., Frau C.M., Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P., García-Ferrer A. Drift correction of lightweight microbolometer thermal sensors on-board unmanned aerial vehicles // *Remote Sens.* 2018. Vol. 10. 615.
17. Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs) // *Photogram. Eng. Remote Sens.* 2015. Vol. 81. P. 281–330.
18. Döpper V., Gränzig T., Kleinschmit B., Förster M. Challenges in UAS-based TIR imagery processing: image alignment and uncertainty quantification // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. 1552.
19. Virtue J., Turner D., Williams G., Zeliadt S., McCabe M., Lucieer A. Thermal sensor calibration for unmanned aerial systems using an external heated shutter // *Drones*. 2021. Vol. 5. 119.
20. Golubkov G.V., Manzhelii M.I., Berlin A.A., Lushnikov A.A., Eppelbaum L.V. Effects of the interaction of microwave radiation with the atmosphere on the passive remote sensing of the Earth's surface: problems and solutions (review) // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018. Vol. 12. P. 725–748.
21. ГОСТ Р 59328 – 2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2021. 36 с.
22. Tymków P., Józkw G., Walicka A., Karpina M., Borkowski A. Identification of water body extent based on remote sensing data collected with unmanned aerial vehicle // *Water*. 2019. Vol. 11. 338.
23. Махинов А.Н., Ким В.И., Дугаева Я.Ю., Козырев Р.С., Матвеев Д.В. Опыт применения БПЛА «Фантом-4» при изучении опасных проявлений русловых процессов в Хабаровском крае // *Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции*. Иркутск: ИГ СО РАН, 2018. С. 85–89.
24. Schumann G.J.P., Muhlhausen J., Andreadis K.M. Rapid mapping of small-scale river-floodplain environments using UAV SfM supports classical theory // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 982. 28.
25. Larson M.D., Simic Milas A., Vincent R.K., Evans J.E. Multi-depth suspended sediment estimation using high-resolution remote-sensing UAV in Maumee River, Ohio // *Int. J. Remote Sens.* 2018. Vol. 39. P. 5472–5489.
26. Wojcik K.A., Bialik R.J., Osinska M., Figielski M. Investigation of sediment-rich glacial meltwater plumes using a high-resolution multispectral sensor mounted on an unmanned aerial vehicle // *Water*. 2019. Vol. 11. 2405.
27. Olivetti D., Cicerelli R., Martinez J.-M., Almeida T., Casari R., Borges H., Roig H. Comparing unmanned aerial multispectral and hyperspectral imagery for harmful algal bloom monitoring in artificial ponds used for fish farming // *Drones*. 2023. Vol. 7. 410.
28. Yao H., Qin R., Chen X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications – a review // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 1443.
29. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review // *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 2014. Vol. 92. P. 79–97. 37.
30. Zeng C., Richardson M., King D.J. The impacts of environmental variables on water reflectance measured using a lightweight unmanned aerial vehicle (UAV)-based spectrometer system // *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 2017. Vol. 130. P. 217–230.

31. Zhang Y., Wu L., Ren H., Liu Y., Zheng Y., Liu Y., Dong J. Mapping water quality parameters in urban rivers from hyperspectral images using a new self-adapting selection of multiple artificial neural networks // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. 336.
32. Shang S., Lee Z., Lin G., Hu C., Shi L., Zhang Y., Li, X., Wu J., Yan J. Sensing an intense phytoplankton bloom in the western Taiwan Strait from radiometric measurements on a UAV // *Remote Sens. Environ.* 2017. Vol. 198. P. 85–94.
33. Kwon Y.S., Pyo J., Kwon Y.-H., Duan H., Cho K.H., Park Y. Drone-based hyperspectral remote sensing of cyanobacteria using vertical cumulative pigment concentration in a deep reservoir // *Remote Sens. Environ.* 2020. Vol. 236. 416.
34. Hsu W.-L., Chang K.-T. Cross-estimation of soil moisture using thermal infrared images with different resolutions // *Sensors and Materials.* 2019. Vol. 31. 387.
35. Dugdale S.J., Kelleher C.A., Malcolm I.A., Caldwell S., Hannah D.M. Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity // *Hydrol. Process.* 2019. Vol. 33. P. 1152–1163.
36. Soil Moisture Mapping. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bst.aero/soil-mosture-mapping/> (дата обращения: 22.09.2025).
37. Acharya B.S., Bhandari M., Bandini F., Pizarro A., Perks M. et al. Unmanned aerial vehicles in hydrology and water management: applications challenges and perspectives // *Water Resour. Res.* 2021. Vol. 57. e2021WR029925.
38. Vélez-Nicolás M., García-López S., Barbero L., Ruiz-Ortiz V., Sánchez-Bellón Á. Applications of unmanned aerial systems (UASs) in hydrology: a review // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. 1359.
39. Sibanda M., Mutanga O., Chimonyo V.G.P., Clulow A.D., Shoko C., Mazvimavi D., Dube T., Mabhaudhi T. Application of drone technologies in surface water resources monitoring and assessment: a systematic review of progress challenges and opportunities in the Global South // *Drones.* 2021. Vol. 5. 84.
40. Flener C., Vaaja M., Jaakkola A., Krooks A., Kaartinen H., Kukko A., Kasvi E., Hyypä H., Hyypä J., Alho P. Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile lidar and UAV-photography // *Remote Sens.* 2013. Vol. 5. P. 6382–6407.
41. Gentile V., Mróz M., Spitoni M., Lejot J., Piégay H., Demarchi L. Bathymetric mapping of shallow rivers with UAV hyperspectral data // *Proceedings of the Fifth International Conference on Telecommunications and Remote Sensing.* Milan. 2016. P. 43–49.
42. Legleiter C.J., McDonald R.R., Nelson J.M., Kinzel P.J., Perroy R.L., Baek D., Seo I.W. Remote sensing of tracer dye concentrations to support dispersion studies in river channels // *J. Ecohydraulics.* 2019. Vol. 4. P. 131–146.
43. Woodget A.S., Dietrich J.T., Wilson R.T. Quantifying below-water fluvial geomorphic change: the implications of refraction correction water surface elevations and spatially variable error // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 2415.
44. Dietrich J.T. Bathymetric structure-from-motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry // *Earth Surf. Proc. Land.* 2017. Vol. 42. P. 355–364.
45. Carrivick J.L., Smith M.W. Fluvial and aquatic applications of Structure from Motion photogrammetry and unmanned aerial vehicle/drone technology // *Wiley Interdiscip. Rev. Water.* 2019. Vol. 6. e1328.
46. Partama I.Y., Kanno A., Ueda M., Akamatsu Y., Inui R., Sekine M., Yamamoto K., Imai T., Higuchi T. Removal of watersurface reflection effects with a temporal minimum filter for UAV-based shallow-water photogrammetry // *Earth Surf. Process. Land.* 2018. Vol. 43. P. 2673–2682.
47. Mandlbürger G., Pfennigbauer M., Schwarz R., Flory S., Nussbaumer L. Concept and performance evaluation of a novel UAV borne topo-bathymetric lidar sensor // *Remote Sensing.* 2020. Vol. 12. 986.
48. Kinzel P.J., Legleiter C.J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric lidar // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 2317.
49. Melcher N.B., Costa J.E., Haeni F.P., Cheng R.T., Thurman E.M., Buursink M. et al. River discharge measurements by using helicopter-mounted radar // *Geophysical Research Letters.* 2002. Vol. 29. P. 41–44.
50. Bandini F., Olesen D., Jakobsen J., Kittel C.M.M., Wang S., García M., Bauer-Gottwein P. Technical note: bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018. Vol. 22. P. 4165–4181.
51. Álvarez L.V., Moreno H.A., Segales A.R., Pham T.G., Pillar-Little E.A., Chilson P.B. Merging unmanned aerial systems (UAS) imagery and echo soundings with an adaptive sampling technique for bathymetric surveys // *Remote Sens.* 2018. Vol. 10. 1362.
52. Богатов, В.В. Федоровский А.С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток: Дальнаука, 2017. 388 с.
53. Ridolfi E., Manciola P. Water level measurements from drones: a pilot case study at a dam site // *Water.* 2018. Vol. 10. 297.
54. Niedzielski T., Witek M., Spallek W. Observing river stages using unmanned aerial vehicles // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016. Vol. 20. P. 3193–3205.
55. Gao A., Wu S., Wang F., Wu X., Xu P., Yu L., Zhu S. A Newly developed unmanned aerial vehicle (UAV) imagery based technology for field measurement of water level // *Water.* 2019. Vol. 11. 124.
56. Bandini F., Butts M., Jacobsen T.V., Bauer-Gottwein P. Water level observations from unmanned aerial vehicles for improving estimates of surface water-groundwater interaction // *Hydrol. Process.* 2017. Vol. 31. P. 4371–4383.
57. Bandini F., Sunding T.P., Linde J., Smith O., Jensen I.K., Köppl C.J., Butts M., Bauer-Gottwein P. Unmanned aerial system (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: comparison of radar altimetry lidar and photogrammetry techniques // *Remote Sens. Environ.* 2020. Vol. 237. 111487.

58. Jiang L., Bandini F., Smith O., Jensen I.K., Bauer-Gottwein P. The value of distributed high-resolution UAV-borne observations of water surface elevation for river management and hydrodynamic modeling // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. 1171.
59. Le Coz J., Hauet A., Pierrefeu G., Dramais G., Camenen B. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flashflood discharge measurements in Mediterranean rivers // *Journal of Hydrology.* 2010. Vol. 394. P. 42–52.
60. Welber M., Le Coz J., Laronne J.B., Zolezzi G., Zamler D., Dramais G., Hauet A., Salvaro M. Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR) // *Water Resour. Res.* 2016. Vol. 52(2). P. 1108–1126.
61. Moramarco T., Singh V.P. Formulation of the entropy parameter based on hydraulic and geometric characteristics of river cross sections // *J. Hydrol. Eng.* 2010. Vol. 15. P. 852–858.
62. Расходомеры для безнапорных каналов SOMMER RQ-30 и SOMMER RG-30. 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://all-pribors.ru/opisanie/59861-15-sommer-rq-30-i-sommer-rg-30-71904> (дата обращения: 22 сентября 2025).
63. Fulton J., Anderson I., Chiu C.-L., Sommer W., Adams J., Moramarco T., Bjerklie D., Fulford J., Sloan J., Best H. et al. QCam: sUAS-based doppler radar for measuring river discharge // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. 3317.
64. Raffel M., Willert C.E., Scarano F., Kahler C.J., Wereley S.T., Kompenhans J. Particle image velocimetry: a practical guide. Springer. 2018. 670 p.
65. Fujita I., Muste M., Kruger A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications // *J. Hydraulic Res.* 1998. Vol. 36. P. 397–414.
66. Muste M., Fujita I., Hauet A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments // *Water Resour. Res.* 2008. Vol. 44. W00D14.
67. Fujita I., Watanabe H., Tsubaki R. Development of a nonintrusive and efficient flow monitoring technique: the space–time image velocimetry (STIV) // *Int. J. River Basin Manag.* 2007. Vol. 5. P. 105–114.
68. Perks M.T., Russell A.J., Large A.R.G. Technical note: advances in flash flood monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs) // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016. Vol. 20. P. 4005–4015.
69. Perks M.T. KLT-IV v1.0: Image velocimetry software for use with fixed and mobile platforms // *Geoscientific Model Development.* 2020. Vol. 13. P. 6111–6130.
70. Leitão J.P., Peña-Haro S., Lüthi B., Scheidegger A., de Vitry M.M. Urban overland runoff velocity measurement with consumer-grade surveillance cameras and surface structure image velocimetry // *J. Hydrol.* 2018. Vol. 565. P. 791–804.
71. Barron J.L., Fleet D.J., Beauchemin S.S. Performance of optical flow techniques // *Int. J. Comput. Vis.* 1994. Vol. 12. P. 43–77.
72. Tauro F., Tosi F., Mattoccia S., Toth E., Piscopia R., Grimaldi S. Optical tracking velocimetry (OTV): leveraging optical flow and trajectory-based filtering for surface streamflow observations // *Remote Sens.* 2018. Vol. 10. 2010.
73. Tauro F., Piscopia R., Grimaldi S. Streamflow observations from cameras: large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? // *Water Resour. Res.* 2017. Vol. 53. P. 10374–10394.
74. Pearce S., Ljubičić R., Peña-Haro S., Perks M., Tauro F., Pizarro A., Sasso S.F.D., Strelnikova D., Grimaldi S., Maddock I. et al. An evaluation of image velocimetry techniques under low flow conditions and high seeding densities using unmanned aerial systems // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. 232.
75. Koutalakis P., Tzoraki O., Zaimes G. UAVs for hydrologic scopes: application of a low-cost UAV to estimate surface water velocity by using three different image-based methods // *Drones.* 2019. Vol. 3. 14.
76. Tauro F., Pagano C., Phamduy P., Grimaldi S., Porfiri M. Large-scale particle image velocimetry from an unmanned aerial vehicle // *IEEE/ASME Trans. Mechatronics.* 2015. Vol. 20. P. 3269–3275.
77. Tauro F., Petroselli A., Porfiri M., Giandomenico L., Bernardi G., Mele F., Spina D., Grimaldi S. A novel permanent gauge-cam station for surface-flow observations on the Tiber River // *Geosci. Instrum. Methods Data Syst.* 2016. Vol. 5. P. 241–251.
78. Lewis Q.W., Lindroth E.M., Rhoads B.L. Integrating unmanned aerial systems and LSPIV for rapid cost-effective stream gauging // *J. Hydrol.* 2018. Vol. 560. P. 230–246.
79. Lou H., Wang P., Yang S., Hao F., Ren X., Wang Y., Shi L., Wang J., Gong T. Combining and comparing an unmanned aerial vehicle and multiple remote sensing satellites to calculate long-term river discharge in an ungauged water source region on the Tibetan Plateau // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. 2155.

References

1. Vinogradov, B.V.; Kondratiev, K.Ya. Space methods of geoscience. Gidrometeoizdat: Leningrad, Russia, 1971; 190 p. (In Russian)
2. McCabe, M.F.; Rodell, M.; Alsdorf, D.E.; Miralles, D.G.; Uijlenhoet, R.; Wagner, W.; Lucieer, A.; Houborg, R.; Verhoest, N.E.C.; Franz, T.E.; Shi, J.; Gao, H.; Wood, E.F. The future of earth observation in hydrology. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2017, 21(7), 3879–3914.
3. Ganzei, S.S.; Ermoshin, V.V.; Mishina, N.V.; Shiraiva, T. Modern land-use in the Amur River basin. *Geography and natural resources.* 2007, 2, 17–25. (In Russian)

4. Baklanov, P.Ya.; Ganzei, S.S. Transboundary territories: problems of sustainable environmental management. *Dal'nauka: Vladivostok, Russia*. 2008; 215 p. (In Russian)
5. Ermoshin, V.V.; Ganzei, S.S.; Mishina, N.V. GIS-provision for geo-ecological investigations of the Amur River basin. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2010, 1, 107–113. (In Russian)
6. Aleksanin, A.I.; Krasnopeev, S.M.; Morozov, M.A. Fomin E.V. Combination of images from Russian satellites “Resurs-P”. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. 2018, 15, 18–28. (In Russian)
7. Egidarev, E.G.; Gorbatenko, L.V.; Tyunyatkin, D.G. Assessment of the flood zone of the Amur River floodplain in 2013 based on space monitoring data. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2021, 6, 56–64. (In Russian)
8. Nerov, I.O.; Krasnopeev, S.M.; Bugaets, A.N.; Belikov, V.V.; Glotko, A.V.; Borisova, N.M.; Vasilyeva, E.S.; Krolevetskaya, Yu.V. Experience in creating a digital relief model for hydrodynamic calculations in the Amur river basin. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2021, 6, 45–56. (In Russian)
9. Plyusnin, V.M.; Makarov, S.A.; Vorobyova, I.B.; Vlasova, N.V. All-Russian scientific and practical conference “Application of unmanned aerial vehicles in geographical research”. *Geography and natural resources*. 2018, 4, 195–196. (In Russian)
10. Fedorovsky, A.S. New opportunities for river research using UAVs. In *Physics of Geospheres. V. 2*. TOI FEB RAS: Vladivostok, Russia. 2020, 177–191. (In Russian)
11. Acharya, B.S.; Bhandari, M.; Bandini, F.; Pizarro, A.; Perks, M. et al. Unmanned aerial vehicles in hydrology and water management: applications, challenges, and perspectives. *Water Resources*. 2021, 57, e2021WR029925.
12. Véléz-Nicolás, M.; García-López, S.; Barbero, L.; Ruiz-Ortiz, V.; Sánchez-Bellón, Á. Applications of unmanned aerial systems (UAS) in hydrology: a review. *Remote Sens*. 2021, 13, 1359.
13. Yao, H.; Qin, R.; Chen, X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications – a review. *Remote Sens*. 2019, 11, 1443.
14. Adão, T.; Hruška, J.; Pádua, L.; Bessa, J.; Peres, E.; Morais, R.; Sousa, J.J. Hyperspectral imaging: a review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sens*. 2017, 9, 1110.
15. Mao, Y.; Betters, C.H.; Evans, B.; Artlett, C.P.; Leon-Saval, S.G.; Garske, S.; Cairns, I.H.; Cocks, T.; Winter, R.; Dell, T. Open HSI: a complete open-source hyperspectral imaging solution for everyone. *Remote Sens*. 2022, 14, 2244.
16. Mesas-Carrascosa, F.-J.; Pérez-Porras, F.; De Larriva, J.E.M.; Frau, C.M.; Agüera-Vega, F.; Carvajal-Ramírez, F.; Martínez-Carricondo, P.; García-Ferrer, A. Drift correction of lightweight microbolometer thermal sensors on-board unmanned aerial vehicles. *Remote Sens*. 2018, 10, 615.
17. Pajares, G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogramm. Eng. Remote Sens*. 2015, 81, 281–330.
18. Döpper, V.; Gränzig, T.; Kleinschmit, B.; Förster, M. Challenges in UAS-based TIR imagery processing: image alignment and uncertainty quantification. *Remote Sens*. 2020, 12, 1552.
19. Virtue, J.; Turner, D.; Williams, G.; Zeliadt, S.; McCabe, M.; Lucieer, A. Thermal sensor calibration for unmanned aerial systems using an external heated shutter. *Drones*. 2021, 5, 119.
20. Golubkov, G.V.; Manzhelii, M.I.; Berlin, A.A.; Lushnikov, A.A.; Eppelbaum, L.V. Effects of the interaction of microwave radiation with the atmosphere on the passive remote sensing of the Earth’s surface: problems and solutions (a review). *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018, 12, 725–748.
21. GOST R 59328 – 2021. Topographic aerial photography. Technical requirements. Standartinform: Moscow, Russia. 2021; 36 p.
22. Tymkow, P.; Józkwó, G.; Walicka, A.; Karpina, M.; Borkowski, A. Identification of water body extent based on remote sensing data collected with unmanned aerial vehicle. *Water*. 2019, 11, 338.
23. Makhinov, A.N.; Kim, V.I.; Dugaeva, Y.Yu.; Kozyrev, R.S.; Matveenko, D.V. Experience of using the Phantom-4 UAV when studying dangerous manifestations of riverbed processes in the Khabarovsk region. In *Use of unmanned aerial vehicles in geographical researches. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. IG SB RAS: Irkutsk, Russia, 2018, 85–89. (In Russian)
24. Schumann, G.J.P.; Muhlhausen, J.; Andreadis, K.M. Rapid mapping of small-scale river-floodplain environments using UAV SfM supports classical theory. *Remote Sens*. 2019, 11, 982.
25. Larson, M.D.; Simic Milas, A.; Vincent, R.K.; Evans, J.E. Multi-depth suspended sediment estimation using high-resolution remote-sensing UAV in Maumee River, Ohio. *Int. J. Remote Sens*. 2018, 39, 5472–5489.
26. Wojcik, K.A.; Bialik, R.J.; Osinska, M.; Figielski, M. Investigation of sediment-rich glacial meltwater plumes using a high-resolution multispectral sensor mounted on an unmanned aerial vehicle. *Water*. 2019, 11, 2405.
27. Olivetti, D.; Cicerelli, R.; Martinez, J.-M.; Almeida, T.; Casari, R.; Borges, H.; Roig, H. Comparing unmanned aerial multispectral and hyperspectral imagery for harmful algal bloom monitoring in artificial ponds used for fish farming. *Drones*. 2023, 7, 410.
28. Yao, H.; Qin, R.; Chen, X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications – a review. *Remote Sens*. 2019, 11, 1443.
29. Colomina, I.; Molina, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*. 2014, 92, 79–97.
30. Zeng, C.; Richardson, M.; King, D.J. The impacts of environmental variables on water reflectance measured using a lightweight unmanned aerial vehicle (UAV)-based spectrometer system. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*. 2017, 130, 217–230.

31. Zhang, Y.; Wu, L.; Ren, H.; Liu, Y.; Zheng, Y.; Liu, Y.; Dong, J. Mapping water quality parameters in urban rivers from hyperspectral images using a new self-adapting selection of multiple artificial neural networks. *Remote Sens.* 2020, 12, 336.
32. Shang, S.; Lee, Z.; Lin, G.; Hu, C.; Shi, L.; Zhang, Y.; Li, X.; Wu, J.; Yan, J. Sensing an intense phytoplankton bloom in the western Taiwan Strait from radiometric measurements on a UAV. *Remote Sens. Environ.* 2017, 198, 85–94.
33. Kwon, Y.S.; Pyo, J.; Kwon, Y.-H.; Duan, H.; Cho, K.H.; Park, Y. Drone-based hyperspectral remote sensing of cyanobacteria using vertical cumulative pigment concentration in a deep reservoir. *Remote Sens. Environ.* 2020, 236, 416.
34. Hsu, W.-L.; Chang, K.-T. Cross-estimation of soil moisture using thermal infrared images with different resolutions. *Sensors and Materials.* 2019, 31, 387.
35. Dugdale, S.J.; Kelleher, C.A.; Malcolm, I.A.; Caldwell, S.; Hannah, D.M. Assessing the potential of drone-based thermal infrared imaging for quantifying river temperature heterogeneity. *Hydrol. Process.* 2019, 33, 1152–1163.
36. Soil Moisture Mapping. Available online: <https://bst.aero/soil-moisture-mapping/> (accessed on 22 September 2025).
37. Acharya, B.S.; Bhandari, M.; Bandini, F.; Pizarro, A.; Perks, M. et al. Unmanned aerial vehicles in hydrology and water management: Applications, challenges, and perspectives. *Water Resour. Res.* 2021, 57, e2021WR029925.
38. Velez-Nicolás, M.; García-López, S.; Barbero, L.; Ruiz-Ortiz, V.; Sánchez-Bellón, A. Applications of unmanned aerial systems (UASs) in hydrology: a review. *Remote Sens.* 2021, 13, 1359.
39. Sibanda, M.; Mutanga, O.; Chimonyo, V.G.P.; Clulow, A.D.; Shoko, C.; Mazvimavi, D.; Dube, T.; Mabhaudhi, T. Application of drone technologies in surface water resources monitoring and assessment: a systematic review of progress, challenges, and opportunities in the Global South. *Drones.* 2021, 5, 84.
40. Flener, C.; Vaaja, M.; Jaakkola, A.; Krooks, A.; Kaartinen, H.; Kukko, A.; Kasvi, E.; Hyyppä, H.; Hyyppä, J.; Alho, P. Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile lidar and UAV-photography. *Remote Sens.* 2013, 5, 6382–6407.
41. Gentile, V.; Mróz, M.; Spitoni, M.; Lejot, J.; Piégay, H.; Demarchi, L. Bathymetric mapping of shallow rivers with UAV hyperspectral data. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Telecommunications and Remote Sensing*, Milan, Italy, 2016, 43–49.
42. Legleiter, C.J.; McDonald, R.R.; Nelson, J.M.; Kinzel, P.J.; Perroy, R.L.; Baek, D.; Seo, I.W. Remote sensing of tracer dye concentrations to support dispersion studies in river channels. *J. Ecohydraulics.* 2019, 4, 131–146.
43. Woodget, A.S.; Carbonneau, P.E.; Visser, F.; Maddock, I.P. Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surf. Proc. Land.* 2014, 40(1), 47–64.
44. Dietrich, J.T. Bathymetric structure-from-motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Proc. Land.* 2017, 42, 355–364.
45. Carrivick, J.L.; Smith, M.W. Fluvial and aquatic applications of structure from motion photogrammetry and unmanned aerial vehicle/drone technology. *Wiley Interdiscip. Rev. Water.* 2019, 6, e1328.
46. Partama, I.Y.; Kanno, A.; Ueda, M.; Akamatsu, Y.; Inui, R.; Sekine, M.; Yamamoto, K.; Imai, T.; Higuchi, T. Removal of watersurface reflection effects with a temporal minimum filter for UAV-based shallow-water photogrammetry. *Earth Surf. Process. Land.* 2018, 43, 2673–2682.
47. Mandlbürger, G.; Pfennigbauer, M.; Schwarz, R.; Flory, S.; Nussbaumer, L. Concept and performance evaluation of a novel UAV borne topo-bathymetric lidar sensor. *Remote Sensing.* 2020, 12, 986.
48. Kinzel, P.J.; Legleiter, C.J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric lidar. *Remote Sens.* 2019, 11, 2317.
49. Melcher, N.B.; Costa, J.E.; Haeni, F.P.; Cheng, R.T.; Thurman, E.M.; Buursink, M. et al. River discharge measurements by using helicopter-mounted radar. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29, 41–44.
50. Bandini, F.; Olesen, D.; Jakobsen, J.; Kittel, C.M.M.; Wang, S.; Garcia, M.; Bauer-Gottwein, P. Technical note: bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018, 22, 4165–4181.
51. Álvarez, L.V.; Moreno, H.A.; Segales, A.R.; Pham, T.G.; Pillar-Little, E.A.; Chilson, P.B. Merging unmanned aerial systems (UAS) imagery and echo soundings with an adaptive sampling technique for bathymetric surveys. *Remote Sens.* 2018, 10, 1362.
52. Bogatov, V.V.; Fedorovsky, A.S. Fundamentals of river hydrology and hydrobiology. *Dalnauka: Vladivostok, Russia.* 2017; 388 p. (In Russian)
53. Ridolfi, E.; Manciola, P. Water level measurements from drones: a pilot case study at a dam site. *Water.* 2018, 10, 297.
54. Niedzielski, T.; Witek, M.; Spallek, W. Observing river stages using unmanned aerial vehicles. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016, 20, 3193–3205.
55. Gao, A.; Wu, S.; Wang, F.; Wu, X.; Xu, P.; Yu, L.; Zhu, S. A newly developed unmanned aerial vehicle (UAV) imagery-based technology for field measurement of water level. *Water.* 2019, 11, 124.
56. Bandini, F.; Butts, M.; Jacobsen, T.V.; Bauer-Gottwein, P. Water level observations from unmanned aerial vehicles for improving estimates of surface water-groundwater interaction. *Hydrol. Process.* 2017, 31, 4371–4383.

57. Bandini, F.; Sunding, T.P.; Linde, J.; Smith, O.; Jensen, I.K.; Köppl, C.J.; Butts, M.; Bauer-Gottwein, P. Unmanned aerial system (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: comparison of radar altimetry, lidar and photogrammetry techniques. *Remote Sens. Environ.* 2020, 237, 111487.
58. Jiang, L.; Bandini, F.; Smith, O.; Jensen, I.K.; Bauer-Gottwein, P. The value of distributed high-resolution UAV-borne observations of water surface elevation for river management and hydrodynamic modeling. *Remote Sens.* 2020, 12, 1171.
59. Le Coz, J.; Hauet, A.; Pierrefeu, G.; Dramais, G.; Camenen, B. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flashflood discharge measurements in mediterranean rivers. *Journal of Hydrology.* 2010, 394, 42–52.
60. Welber, M.; Le Coz, J.; Laronne, J.B.; Zolezzi, G.; Zamler, D.; Dramais, G.; Hauet, A.; Salvaro, M. Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resour. Res.* 2016, 52(2), 1108–1126.
61. Moramarco, T.; Singh, V.P. Formulation of the entropy parameter based on hydraulic and geometric characteristics of river cross sections. *J. Hydraulic Eng.* 2010, 15, 852–858.
62. Flowmeters for free-flow channels SOMMER RQ-30 и SOMMER RG-30. 2024. Available online: <https://allpribors.ru/opisanie/59861-15-sommer-rq-30-i-sommer-rg-30-71904>. (accessed on 22 September 2025). (In Russian)
63. Fulton, J.; Anderson, I.; Chiu, C.-L.; Sommer, W.; Adams, J.; Moramarco, T.; Bjerklie, D.; Fulford, J.; Sloan, J.; Best, H. et al. QCam: sUAS-based doppler radar for measuring river discharge. *Remote Sens.* 2020, 12, 3317.
64. Raffel, M.; Willert, C.E.; Scarano, F.; Kahler, C.J.; Wereley, S.T.; Kompenhans, J. Particle image velocimetry: a practical guide. Springer, 2018; 670 p.
65. Fujita, I.; Muste, M.; Kruger, A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *J. Hydraulic Res.* 1998, 36, 397–414.
66. Muste, M.; Fujita, I.; Hauet, A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resour. Res.* 2008, 44, W00D14.
67. Fujita, I.; Watanabe, H.; Tsubaki, R. Development of a nonintrusive and efficient flow monitoring technique: the space–time image velocimetry (STIV). *Int. J. River Basin Manag.* 2007, 5, 105–114.
68. Perks, M.T.; Russell, A.J.; Large, A.R.G. Technical note: advances in flash flood monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016, 20, 4005–4015.
69. Perks, M.T. KLT-IV v1.0: Image velocimetry software for use with fixed and mobile platforms. *Geoscientific Model Development.* 2020, 13, 6111–6130.
70. Leitão, J.P.; Peña-Haro, S.; Lüthi, B.; Scheidegger, A.; de Vitry, M.M. Urban overland runoff velocity measurement with consumer-grade surveillance cameras and surface structure image velocimetry. *J. Hydrol.* 2018, 565, 791–804.
71. Barron, J.L.; Fleet, D.J.; Beauchemin, S.S. Performance of optical flow techniques. *Int. J. Comput. Vis.* 1994, 12, 43–77.
72. Tauro, F.; Tosi, F.; Mattoccia, S.; Toth, E.; Piscopia, R.; Grimaldi, S. Optical tracking velocimetry (OTV): leveraging optical flow and trajectory-based filtering for surface streamflow observations. *Remote Sens.* 2018, 10, 2010.
73. Tauro, F.; Piscopia, R.; Grimaldi, S. Streamflow observations from cameras: large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? *Water Resour. Res.* 2017, 53, 10374–10394.
74. Pearce, S.; Ljubičić, R.; Peña-Haro, S.; Perks, M.; Tauro, F.; Pizarro, A.; Sasso, S.F.D.; Strelnikova, D.; Grimaldi, S.; Maddock, I. et al. An evaluation of image velocimetry techniques under low flow conditions and high seeding densities using unmanned aerial systems. *Remote Sens.* 2020, 12, 232.
75. Koutalakis, P.; Tzoraki, O.; Zaimes, G. UAVs for hydrologic scopes: application of a low-cost UAV to estimate surface water velocity by using three different image-based methods. *Drones.* 2019, 3, 14.
76. Tauro, F.; Pagano, C.; Phamduy, P.; Grimaldi, S.; Porfiri, M. Large-scale particle image velocimetry from an unmanned aerial vehicle. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics.* 2015, 20, 3269–3275.
77. Tauro, F.; Petroselli, A.; Porfiri, M.; Giandomenico, L.; Bernardi, G.; Mele, F.; Spina, D.; Grimaldi, S. A novel permanent gauge-cam station for surface-flow observations on the Tiber River. *Geosci. Instrum. Methods Data Syst.* 2016, 5, 241–251.
78. Lewis, Q.W.; Lindroth, E.M.; Rhoads, B.L. Integrating unmanned aerial systems and LSPIV for rapid, cost-effective stream gauging. *J. Hydrol.* 2018, 560, 230–246.
79. Lou, H.; Wang, P.; Yang, S.; Hao, F.; Ren, X.; Wang, Y.; Shi, L.; Wang, J.; Gong, T. Combining and comparing an unmanned aerial vehicle and multiple remote sensing satellites to calculate long-term river discharge in an ungauged water source region on the Tibetan Plateau. *Remote Sens.* 2020, 12, 2155.



Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 15.10.25; принята к публикации 10.11.2025.

The article was submitted 28.07.2025; approved after reviewing 15.10.2025; accepted for publication 10.11.2025.