НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕК С ПОМОЩЬЮ БПЛА

Федоровский А.С.

Дальневосточное отделение РАН, Владивосток E-mail: fedorovskiy@hq.febras.ru

Аннотация

Выполнен обзор современных дистанционных методов оценки характеристик рек с помощью БПЛА. Показаны возможности и недостатки использования фотоизображений, лазерного, радиолокационного зондирования, привязных устройств для измерения ширин, глубин, высот уровня водной поверхности, скоростей течения и расходов воды рек с БПЛА.

Ключевые слова: гидрологические наблюдения, БПЛА, дрон, бесконтактные измерения.

NEW OPPORTUNITIES FOR RIVER EXPLORATION WITH UAV

Fedorovskiy A.S.

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok E-mail: fedorovskiy@hq.febras.ru

Abstract

A review of modern remote sensing methods for assessing river parameters using drones is carried out. The possibilities and disadvantages of using photographic images, laser, radar sounding, tethered devices for measuring widths, depths, heights of the water surface, flow velocities and flow rates of rivers from UAVs are shown.

Keywords: hydrological observations, UAV, drone, contactless measurements.

Введение

Последние десятилетия характеризуются ростом числа и масштабов катастрофических наводнений, в том числе в бассейне реки Амур [2]. Все методы снижения ущерба, включая строительство и регулирование стока водохранилищами, возведение защитных сооружений, базируются на наблюдениях за состоянием и динамикой водных объектов. Наземные наблюдения за реками, озерами и водохранилищами чрезвычайно дороги, часто страдают низким качеством, их автоматизация сталкивается со многими трудноразрешимыми проблемами, несмотря на то что на эти цели выделяются значительные средства. На сегодняшний день практически все проводимые мероприятия не решают проблемы увеличения количества и улучшения качества гидрологических наблюдений, которое продолжают снижаться. Нужны принципиально новые подходы. Один из них – использование для гидрологических наблюдений беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), часто называемых дронами, с соответствующим оборудованием.

Полезная нагрузка малых БПЛА до недавнего времени ограничивалась фотокамерами, не считая датчики, обеспечивающие, собственно, полет носителя. Получаемые изображения земной поверхности, в том числе мультиспектральные, позволяют решать многие задачи как в гидрологии, так и в ряде других областей. Применение активных методов ДЗ (лазерное, радиолокационное), существенно расширяющих их возможности для измерения уровня воды, глубины и скорости течения рек, сдерживается отсутствием легких сенсоров. Актуальность проблемы нельзя переоценить. Несмотря на то что методы и оборудование для ДЗ со спутников, самолетов и вертолетов разработаны давно и успешно используются, их массовое применение ограничено высокой стоимостью, сложностью организации полетов и в конечном счете нерентабельностью обслуживания большого количества пунктов гидрологических наблюдений на малых и средних реках, на которых, собственно, и формируется паводочный сток.

На первых порах дроны применялись большей частью для аэрофотосъемки в интересах геодезии и картографии [3, 5]. По мере накопления опыта разработки летающих платформ, в том числе создания легких и мощных электродвигателей, аккумуляторов большой электрической емкости появилась возможность поднимать в воздух на относительно продолжительное время разнообразное измерительное оборудование. Одновременно с этим стали развиваться целые отрасли, разрабатывающие компактные измерительные системы для дронов. Выделяются следующие системы (направления) ДЗ, платформой которых служат БПЛА:

- 1. Системы измерений по фотоизображениям;
- 2. Лазерные и радиолокационные системы измерений;
- 3. Гибридные системы как комбинация других систем измерений.

В статье сделана попытка обобщить имеющийся опыт применения малых беспилотных летательных аппаратов для оценки таких гидрологических характеристик, как высота уровня воды, глубина водоема, скорость течения и расход воды с применением современных бесконтактных методов.

Системы измерений по видео- и фотоизображениям

Измерения параметров водных объектов по фотоснимкам с летательных аппаратов имеют длинную историю [3, 4, 5]. Так, еще в 60-х годах прошлого века в аэрогеодезии широко применялись стереофотограмметрические методы измерения глубин рек и прибрежных участков морей по разности продольных параллаксов точек аэрофотоснимков с изображением дна реки сквозь прозрачный слой воды. При аэрофотосъемке водоемов проектирующие лучи проходят две среды – воздух и воду, имеющие различные коэффициенты преломления. В результате проектирующий луч изменяет направление в воде, и точки дна изображаются на аэрофотоснимке с некоторым линейным искажением, которое и лежит в основе оценки глубины. В гидрологии этот метод сдерживался из-за низкой прозрачности речных вод, зависимости от погодных условий, прибрежной растительности и других факторов. Продолжение «оптического» направления получило в методе оценки глубин, основанном на связи глубины потока с яркостью пикселов на RGB-аэрофотоснимках, так как глубокий водный водоем выглядит темнее на фотографии, чем мелкий [16].

Кроме глубины, отраженный сигнал подвержен влиянию таких факторов, как цвет и мутность воды, отражательная способность донных отложений. Предложен алгоритм устранения влияния на сигнал прочих факторов, кроме глубины. Авторы отмечают, что в экспериментах съемки выполнялись с БПЛА бытовой камерой, снабженной объективом с переменным фокусным расстоянием невысокого разрешения, что ограничивало резкость фотографий и таким образом снижало точность оценки глубин. В этой связи рекомендовано использование высококачественных широкоугольных объективов с фиксированным фокусным расстоянием, которые дают четкие изображения и широкий охват при съемке на низких высотах полета, что также улучшает разрешение снимка.

Косвенные методы оценки скоростей течения применяются в условиях невозможности проведения инструментальных наблюдений [1]. В гидрометрии широко распространен метод, основанный на измерении времени перемещения поверхностных или глубинных поплавков Δt на участке реки известной протяженности Δl . Скорость течения оценивается по формуле $V = \Delta l / \Delta t$. Точность метода во многом определяется условиями измерений. В 60-х годах прошлого века проектно-изыскательские и научно-исследовательские институты «Ленгидропроект», «Гидропроект имени С.Я. Жука» имели в своем распоряжении пилотируемые самолеты и широко применяли аэрометоды для оценки как поверхностных, так и средних скоростей течения рек путем последовательной съемки предварительно сброшенных вдоль створа реки поплавков (сосудов с красящей жидкостью). Со временем эти методы совершенствовались, однако смысл их остался прежним.

В международной гидрологической практике распространены следующие методы оценки поверхностных скоростей течения: измерение скорости по слежению за плавающими объектами – PTV (Particle tracking velocimetry), измерение скорости по анализу изображений объектов – PIV (Particle image velocimetry) и его развитие – LSPIV (Large scale particle image velocimetry), измерение скорости на основе учета пространственно-временных изменений на изображениях – STIV (Space-time image velocimetry) и некоторые другие. Так, оценка поверхностной скорости течения реки методом STIV предпринята в работе [9]. Применены две процедуры: стабилизация изображения и оценка скорости потока. В процедуре стабилизации размытость видеоизображения корректировалась путем комбинации двух схем обработки изображений: корреляция фазы, инвариантной к вращению, – RIPOC (The rotation invariant phase only correlation) и масштабно-инвариантное преобразование функции – SIFT (The scale invariant feature transform). Оценка поверхностной скорости потока проводилась на основе учета пространственно-временных изменений на снимке (STIV), а именно адвекции поверхностных объектов, таких как рифели или плавающие объекты. Метод применен к половодью 2014 года на р. Уоно (Япония) шириной около 150 метров на участке 200 метров. Точность метода была оценена сравнением с данными акустического профилографа – ADCP (Acoustic Doppler current profiler). Также получено хорошее совпадение с распределением поверхностных скоростей, оцененного методом STIV по видеоизображениям с береговой видеокамеры.

В работе [18] выполнен критический анализ применения методов LSPIV и PTV, определены их основные достоинства и недостатки. Показано, что фиксируемые на изображении небольшие волны на поверхности воды вследствие турбулентности перемещаются со скоростью потока, но волны на свободной поверхности могут генерироваться силами тяжести, которые перемещаются во всех направлениях и могут нарушить их движение, а следовательно, и точность оценки скорости и направления течения. В работе [17] разработан алгоритм, позволяющий устранять такие нарушения и очищать изображения от наложений на волны, перемещающиеся со скоростью потока. Процедура, предложенная в этом исследовании, может значительно улучшить точность оценки поверхностной скорости потока также в условиях влияния ветровых волн. Влияние ветрового волнения на оценку поверхностной скорости реки исследовано в работе [19]. Предложен новый метод, позволяющий оценивать поверхностные скорости и направления движения воды более устойчиво по сравнению с LSPIV и STIV.

Важным аспектом точности расчета расхода воды служит переходный коэффициент α между поверхностной и средней скоростью потока. Этот вопрос исследовался для 3611 станций во Франции [13]. Среднее значение коэффициента оценено равным 0,8, установлена связь α с гидравлическим радиусом и коэффициентом шероховатости русла.

В университете Кобэ (Япония) разработана целостная система наблюдений за распределением поверхностной скорости по методу STIV и оценке расхода воды в реке [10]. Система получила название

KU-STIV (Kobe university space-time image velocimetry). Она использует видеозаписи с береговых камер и беспилотных самолетов. Компьютерной программой на поверхность реки вдоль створа на скоростных вертикалях накладывается виртуальная «сетка линий» длиной 10–20 м (рис. 1). Скорость потока вычисляется по времени, в течение которого рябь на водной поверхности или плавающие предметы переместятся вдоль этих линий, чтобы затем косвенно вычислить расход воды в этом створе. Поверхностные скорости, расходы воды по этой системе находятся в хорошем соответствии с данными акустического профилографа, однако система KU-STIV работает более оперативно и безопасно.

Высота уровня воды над некоторой плоскостью сравнения (обычно над уровнем моря, абс. м) определяется для оценки площади поперечного сечения реки при расчете расхода воды, напора воды на гидроэлектростанции, запаса воды в водохранилище и прочих характеристик в гидрологии, гидротехнике и других областях. Сеть приборов для измерения уровня воды отражает локальные условия, их данные сложно, а зачастую невозможно обобщить в пространстве, что



Puc. 1. Снимок с экрана ПК англоязычной версии системы KU-STIV. (по: http://cdn.phys.org/newman/gfx/ news/ 2016/1-measuringriv.jpg)

особенно важно в период наводнений. В работе [12] представлен новый подход к дистанционной оценке высоты уровня воды путем интегрирования фотограмметрических измерений по снимкам с БПЛА и метода распознавания образов. Метод был опробован для измерения уровня воды в нижнем бьефе гидроэлектроэнергии Мяовей (Miaowei) (КНР) и результаты показали, что технология имеет высокую точность и оперативность. Авторы отметили также, что уровень измерялся в условиях бурного потока нижнего бьефа ГЭС, в которых другими методами его измерить невозможно.

Лазерные и радиолокационные системы измерений

Комплексный подход к оценке расхода воды с БПЛА дан в работе [14]. В ней измерения поверхностной скорости течения воды выполнены по тепловым изображениям и батиметрического лазерного лидара. Из-за веса датчиков потребовались два БПЛА. Первый переносил камеры инфракрасного и видимого диапазона, второй – поляризационный лидар. Был получен ряд тепловых разновременных изображений и применен метод измерения скорости по изображениям объектов (PIV), в качестве которых выступали термические неоднородности на водной поверхности. Обнаружить их оказалось легче, чем следить за движением плавающих объектов (например, пена, мусор) в видимом диапазоне с тем, чтобы выполнить стандартный метод оценки скорости по крупномасштабным изображениям частиц (LSPIV). С помощью лидара измерялись глубины (батиметрия) для расчета площади поперечного сечения потока. Измерения проведены на двух поперечных створах реки, чтобы оценить точность дистанционно измеренных скоростей, глубин и расходов. Тепловой PIV оценил скорости, которые были достаточно близки ($R^2 = 0.82$ и 0.64) к скоростям, измеренным акустическим профилографом. Глубины, полученные лидаром, вполне соответствовали измеренным значениям $(R^2 = 0.95)$. В работе отмечается, что за последние 20 лет лазерная батиметрия, которая была первоначально разработана для прибрежных морских областей, получила распространение в речных исследованиях. Однако прозрачность воды и коэффициент отражения дна могут ограничить успех любого пассивного или активного оптического

метода в реках, включая батиметрические измерения лидаром. Альтернативное направление – радиолокационное зондирование с помощью устройств, получивших название георадар – GPR (Ground penetrating radar). Из-за особенностей поглощения зондирующего сигнала в воде георадар может быть применен в реках с содержанием взвешенных наносов до 10000 мг/л. Авторы отмечают, что технология GPR весьма перспективна для бесконтактного батиметрического картографирования в пресноводных реках с высокими концентрациями взвешенных наносов.

Компания Astralite изготовила первый в своем роде компактный лидар, предназначенный для проведения топографических и батиметрических исследований, который благодаря небольшому весу можно закрепить на БПЛА среднего размера (рис. 2).

Лидар весит около 5 кг, позволяет получить карту распределения глубин до 5 метров.

Возможность использования радиолокации для гидрологических целей рассмотрена в работе [6]. Отмечается, что средства сверхширокополосной радиолокации, как радары подповерхностного зондирования (георадары), позволяют проводить непрерывный мониторинг исследуемой среды для дальнейшей обработки, анализа и контроля полученных данных. Особенно они эффективны при установке на небольших БПЛА. Кратко рассмотрев теорию радиолокации, авторы представили метод обнаружения СШПС с неизвестным временем



Puc. 2. Лидар Edge компании Astralite на БПЛА DJI Matrice 600 Pro (по: https://hightech.plus/2019/10/21/sozdan-perviikompaktnii-lidar-dlya-podvodnih-issledovanii)

прихода и с узкополосными помехами, помимо белого шума. Также обозначен выбор двух преобразований для последующего анализа СШПС, имеющих преимущества перед остальными как в теоретической, так и практической областях. Авторы работы [8] сосредоточили внимание на тестировании георадара и миниатюрного лазерного дальномера для измерения высоты уровня водной поверхности. Точность оценки георадаром составила не менее 0,5% при максимальной высоте полета 60 м. Лазерный дальномер показал самое низкое расхождение луча, которое позволило избежать помех от береговой растительности. Вместе с системой спутниковой навигации GNSS дальномер позволяет измерить уровень воды со средней точностью не менее 5–7 см.

Значительные усилия по установке георадаров на дроны предпринимаются в подразделениях Геологической службе США (USGS), занимающихся гидрологическими наблюдениями. Так, в работе [10] приведены сведения о практических испытаниях небольшого георадара, установленного на дроне (рис. 3).

Среди специализированных георадаров, устанавливаемых на дроны, можно выделить модели: Radarteam Cobra Plug-in, SPG-1600,

Zond-12e 500A (рис. 4, a, b, c соответственно).

Конструирование специализированного «гидрологического радара» для дрона на основе существующих электронных конструкций показано в работе итальянских специалистов [10]. Авторы сделали попытку установить на дроне усовершенствованный миниатюрный доплеровский радарный датчик, работающий на частоте 24 ГГц и первоначально предназначенный для оценки трафика дорожного движения, для



Puc. 3. Дрон с геолокатором и акустический профилограф перед экспериментом (по: https://www.usgs.gov/centers/co-water/ science/radar-drones?)



Puc. 4. Георадары, установленные на дроны: a) – Radarteam Cobra Plug-in (по: https://sovzond.ru/press-center/news/corporate/4527); б) – SPG-1600 (по: http://geo-scanner.ru/georadar-spg-1600-); c) – Zond-12e 500A (по: https:// radseismsys.ru/catalog/georadary/zond-12e-500a-mgts-bpla-dron)

оценки поверхностной скорости потока. Компоненты датчика смонтированы на плате с антенной на одной стороне и электроникой – на другой. Ширина луча антенны на уровне половинной мощности не превышает 10 градусов. Датчик монтируется на дроне под углом 45 градусов относительно плоскости полета. С момента выхода статьи авторов прошло уже 5 лет, и на рынке появились подобные приборы. Так, в КНР разработан радар для измерения поверхностной скорости течения водных объектов Stalker II SVR (рис. 5).

Диапазон измерения скорости течения составляет от 0,15 до 15 м/с при погрешности не более 8,8 мм/сек и разрешении ± 1 мм/сек.



Puc. 5. 24 ГГц микроволновой радар Stalker II SVR (по: https://aliexpress.ru/item/4000189294457.html)

Продолжительность измерения: $2 \div 240$ сек, интервал выборки от 8 сек до 5 час. Расстояние от плоскости датчика до поверхности воды от 0,5 до 35 м. Компоненты датчика смонтированы подобно плате, рассмотренной выше. SVR использует доплеровский эффект для измерения поверхностной скорости течения воды, излучая электромагнитную волну частотой 24,15 ГГц. Прибор содержит все необходимые компоненты для встраивания в измерительную гидрологическую систему, в том числе интерфейс ввода/вывода. Размер датчика: 106×79 мм, напряжение питания: $5,5 \div 30$ В постоянного тока, сила тока: 130 мА (в режиме измерения), 1 мА (в режиме ожидания), угол передачи антенны: $20 \times 12^\circ$. Подключение к SVR осуществляется через шину RS-485, скорость передачи – 9600 бод, разрядность – 8 бит. Прибор уже устанавливается на гидростанциях КНР в составе автоматизированных гидрологических комплексов.

Гибридные системы

Оригинальный метод измерения глубины реки, который можно отнести к гибридным системам измерений, предложен в работе [7]. Авторы использовали компактный однолучевой эхолот, привязанный к БПЛА типа DJI Mavic Pro (рис. 6).



Рис. 6. Применение компактного плавающего эхолота, перемещаемого БПЛА, для измерения глубин: а) на канале Марребэк; б) озере Фюрес (Дания)

Разработанный метод комбинирует преимущества БПЛА с потенциалом эхолота, который может измерять глубины с точностью около 2% фактической глубины в диапазоне от 0,1 до 35 м вне зависимости от мутности воды.

Заключение

Опыт применения для исследования рек малых беспилотных летательных аппаратов, или как их еще называют – дронов, снабженных различными приборами для проведения бесконтактных измерений, позволяет констатировать появление нового направления – дронометрии. Объектом этого направления стали важнейшие характеристики рек: высота уровня воды, глубина водоема, скорость течения и расход воды. Диапазон используемых дронами средств бесконтактных измерений уже достаточно широк. Если на начальном этапе их применения в гидрологии активно использовались главным образом фотокамеры, в том числе мультиспектральные, то в настоящее время стали широко применяться лазерная и радиолокационная техника. Созданы компактные приборы, которые могут быть установлены на малые аппараты. Полученные оценки точности измерений характеристик водных объектов вполне обнадеживающие. Специализированные гидрологические БПЛА могут существенно повысить безопасность гидрологических работ, особенно в периоды наводнений, повысить число пунктов наблюдений за водными объектами при снижении себестоимости работ. В конечном счете заполнить разрыв между спутниковым зондированием и наземными наблюлениями.

Литература

- 1. Богатов В.В, Федоровский А.С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток: Дальнаука, 2017. 384 с.
- 2. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. № 2. С. 111–122.
- Зинченко О.Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. М.: Ракурс, 2011. 12 с. https://racurs.ru/presscenter/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-for-mapping-1.

- Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Академия. 2004. 336 с.
- Сечин А.Ю., Дракин М.А., Киселева А.С. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. Ч. 2. М.: Ракурс. 2011. 12 с. https://racurs.ru/press-center/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/ UAV-for-mapping-2.
- Туленков Н.И., Nhat D.D. РЛС подповерхностного зондирования со сверхширокополосным сигналом (СШПС) // Мат-лы междунар. конф. «Системы радиолокационного мониторинга» / Radar monitoring systems. 2017. С. 33–41.
- Bandini F., Olesen D., Jakobsen J., Kittel C.M.M., Wang Sh., Garcia M., Bauer-Gottwein Pe. 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. V. 22. P. 4165–4181. https://doi.org/10.5194/hess-22-4165-2018.
- Bandinia F., Jakobsenb J., Olesenb D., Reyna-Gutierreza J.A., Bauer-Gottweina P. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight unmanned aerial vehicles // Journal of Hydrology. 2017. V. 548. P. 237–250.
- Fujita I., Notoya Y., Shimono M. Development of UAV-based river surface velocity measurement by STIV based on high-accurate image stabilization techniques // E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. Hague, Netherlands. 2015. P. 1–10.
- Fujita I. Measuring river surface flow with image analysis. 2016. http://phys.org/ news/2016-04-river-surface-image-analysis.html.
- 11. Fulton J.W. Radar on Drones. 2020. https://www.usgs.gov/centers/co-water/science/ radar-drones.
- 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. V. 11. P. 1–15. www.mdpi.com/journal/water.
- Hauet A., Morlot T., Daubagnan L. Velocity proale and depth-averaged to surface velocity in natural streams: a review over a large sample of rivers // Book of abstracts conference «River Flow 2018». Lyon-Villeurbanne (France), 2018. P. 221–222.
- Kinzel P.J., Legleiter C.J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric LIDAR // Remote Sensing. 2019. 11. 2317. https://www.mdpi.com/2072-4292/11/19/2317.
- Moramarco T., Alimenti F., Zucco G., Barbetta S., Tarpanelli A., Brocca L., Mezzanotte P., Rosselli L., Orecchini G., Virili M., Valigi P., Ciarfuglia T., Pagnottelli S. A prototype of radar-drone system for measuring the surface flow velocity at river sites and discharge estimation // Geoph. Res. Abs. 2015. V. 17. https://www.researchgate. net/publication/275221939.
- 16. Peggy Z., Flener C. Experiences from the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for River Bathymetry Modelling in Norway // Vann (03). 2013. P. 351–360.
- Tani K., Fujita I. Wavenumber-frequency analysis of river surface texture to improve accuracy of image-based velocimetry helicopter // Book of abstracts conf. Lyon-Villeurbanne (France). 2018. P. 201.

- Tauro F., Piscopia R., Grimaldi S. Streamflow observations from cameras: Large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? // Water Res. Res. 2017. V. 53 (12). P. 10374–10394.
- Tsuji I., Tani K., Fujita I., Notoya Y. Development of aerial space time volume velocimetry for measuring surface velocity vector distribution from UAV // Book of abstracts conf. Lyon-Villeurbanne (France). 2018. P. 202.

References

- Bogatov V.V., Fedorovskiy A.S. Basics of river hydrology and hydrobiology. Vladivostok: Dalnauka, 2017. 384 p.
- Danilov-Danilyan V.I., Gelfan A.N., Motovilov Yu.G., Kalugin A.S. Catastrophic flood in the Amur river basin of 2013: formation conditions, assessment of frequency, modeling results // Wat. Res. 2014. V. 41 (2). P. 111–122.
- Zinchenko O.N. Unmanned aerial vehicle: aerial photography application for mapping. M.: Rakurs. 2011. 12 p. https://racurs.ru/press-center/articles/bespilotnye-letatelnyeapparaty/UAV-for-mapping-1.
- 4. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. Aerospace methods of geographical research. M.: Academy. 2004. 336 p.
- Sechin A. Yu., Drakin M.A., Kiseleva A.S.M.: Rakurs. 2011. 12 p. https://racurs.ru/ press-center/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-for-mapping-2.
- Tulenkov N.I., Nhat D.D. Subsurface sensing radar with ultra-wideband signal (UWBL)
 // Mat. of the int. conf. "Radar monitoring systems" / Radar monitoring systems. 2017.
 P. 33–41.
- Bandini F., Olesen D., Jakobsen J., Kittel C.M.M., Wang Sh., Garcia M., Bauer-Gottwein Pe. 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. V. 22. P. 4165–4181. https://doi.org/10.5194/hess-22-4165-2018.
- Bandini F., Jakobsen J., Olesen D., Reyna-Gutierreza J.A., Bauer-Gottweina P. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight unmanned aerial vehicles // J. of Hydrology. 2017. V. 548. P. 237–250.
- Fujita I., Notoya Y., Shimono M. Development of UAV-based river surface velocity measurement by STIV based on high-accurate image stabilization techniques // E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. Hague, Netherlands. 2015. P. 1–10.
- Fujita I. Measuring river surface flow with image analysis. 2016. http://phys.org/ news/2016-04-river-surface-image-analysis.html.
- 11. Fulton J.W. Radar on Drones. 2020. https://www.usgs.gov/centers/co-water/science/ radar-drones.
- 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. V. 11 P. 1–15. www.mdpi.com/journal/water.

- Hauet A., Morlot T., Daubagnan L. Velocity proale and depth-averaged to surface velocity in natural streams: a review over a large sample of rivers // Book of abstracts conference "River Flow 2018". Lyon-Villeurbanne (France), 2018. P. 221–222.
- Kinzel P.J., Legleiter C.J. sUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric LIDAR // Remote Sensing. 2019. 11. 2317; DOI: 10.3390/rs11192317. www.mdpi.com/journal/remotesensing.
- Moramarco T., Alimenti F., Zucco G., Barbetta S., Tarpanelli A., Brocca L., Mezzanotte P., Rosselli L., Orecchini G., Virili M., Valigi P., Ciarfuglia T., Pagnottelli S. A prototype of radar-drone system for measuring the surface flow velocity at river sites and discharge estimation // Geoph. Res. Abs. 2015. V. 17. https://www.researchgate. net/publication/275221939.
- 16. Peggy Zinke and Claude Flener. Experiences from the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for River Bathymetry Modelling in Norway // Vann (03). 2013. P. 351–360.
- Tani K., Fujita I. Wavenumber-frequency analysis of river surface texture to improve accuracy of image-based velocimetry helicopter // Book of abstracts conference. Lyon-Villeurbanne (France). 2018. P. 201.
- Tauro F., Piscopia R., Grimaldi S. Streamflow observations from cameras: Largescale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? // Water Resources Research. 2017. V. 53 (12). P. 10374–10394.
- Tsuji I., Tani K., Fujita I., Notoya Y. Development of aerial space time volume velocimetry for measuring surface velocity vector distribution from UAV // Book of abstracts conf. Lyon-Villeurbanne (France). 2018. P. 202.