Monitoring systems of environment No 1 (55) 2024

https://elibrary.ru/fwvfwa

УДК 502.2.05 DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-62-70

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИСТАНЦИОННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДНОМ ОБЪЕКТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

И.А. Шишкин[1], Х.О. Бархуев[2], Н.А. Жильникова[1], А.А. Березина[1], В.О. Смирнова[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
[2]Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики
РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18
E-mail: axado111@gmail.com

В статье рассмотрены методы дистанционного измерения отдельных характеристик качества воды в природных водоемах. Определена возможность их реализации для оценки качества поверхностных вод с применением беспилотных летательных аппаратов. Проведена оценка существующих инструментов дистанционного мониторинга. Обосновано использование комплекса систем видеозахвата для дистанционного распознавания источников загрязнения водных объектов. Предложена методика определения концентраций загрязняющих веществ в природных водах с помощью дистанционных методов. Проведены исследования в зоне рассеивающего водовыпуска целлюлозного завода, результаты которых показали высокую эффективность применения дронов при проведении дистанционного мониторинга водных объектов. Рассмотрен беспилотный летательный аппарат, относящийся к типу квадрокоптеров, способный нести полезную нагрузку в виде мультиспектральных камер, пробоотборников, гидрологических зондов и позволяющий проводить мониторинг водных объектов дистанционно. Квадрокоптер, оснащенный аналитическими приборами позволяет проводить удаленное изучение и анализ состояния водных ресурсов без непосредственного участия человека. Этот инновационный инструмент представляет собой значительный прогресс в области экологического мониторинга и позволяет более эффективно контролировать и управлять водными ресурсами. В данной статье обосновывается применение беспилотных летательных аппаратов для оценки качества поверхностных вод, преимущества их использования и перспективы развития в проведении исследований водных объектов.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, беспилотный летательный аппарат, качество воды, водный объект, дрон, экологический контроль, экологический мониторинг.

Поступила в редакцию: 09.02.2024. После доработки: 11.03.2024. Принята к печати: 22.03.2024.

Введение. Дистанционный мониторинг – необходимая составная часть подсистемы оперативного мониторинга водных объектов. Из-за характерных небольших размеров внутренних водоемов (за исключением морей и крупных озер) использование космической информации малоэффективно, так как разрешающей способности мультиспектральных спутниковых снимков, составляющей 20–50 м на пиксель, для анализа показателей в небольших водоемах недостаточно. Более эффективным представляется использование данных съемок беспилотного летательного аппарата (БПЛА), при этом съемку можно производить даже при определенных видах облачности [1]. Спутниковые же снимки эффективны при мониторинге больших озер, морей и океанов, где применение БПЛА из-за ограниченного временем полета и дальности радиосвязи затруднительно.

Одним из наиболее перспективных вариантов применения БПЛА при решении задачи дистанционного мониторинга является использование мультиспектральных камер. Полученная в результате спектральной съемки картина позволяет определить параметры воды в водных объектах с достаточно высокой точностью и за короткое время.

Методики определения показателей качества воды с помощью спектральных съемок подробно описаны при использовании космоснимков. Недостатками их применения является низкая оперативность получения данных, так как необходимо условие, при котором нужный

спутник будет находиться над определенной территорией. Это является большой проблемой при оперативном мониторинге, например, когда необходимо в кратчайшие сроки оценить масштаб техногенной катастрофы.

Применение данных методик с использованием мультиспектральных камер в сочетании с БПЛА позволит в оперативном режиме провести анализ широких площадей за короткое время [2].

Методы дистанционной идентификации показателей качества воды. В работе предложена методика дистанционной идентификации концентрации веществ в природных водах, основанная на определении взаимосвязи между концентрацией рассчитываемого параметра и яркостью пикселя аэрофотоснимка методом дешифровки (распознавания объектов, их свойств и взаимосвязей по изображениям, полученным при съёмке из космоса, с самолётов, беспилотных летательных аппаратов), с целью оценки качества поверхностных вод в акватории Финского залива по концентрации взвешенных веществ. Пассивной дешифровке, то есть анализу показателей по анализу восходящего солнечного излучения, поддаются только фотолюминесцирующие показатели, такие как мутность, температура, концентрация взвешенных веществ, концентрация хлорофилла «а» и т. д. Для определения таких показателей как концентрация органических веществ и других применяют метод активного зондирования, предполагающий искусственный источник электромагнитного излучения.

В качестве исходных аэрофотоснимков выбраны снимки со спутника Sentinel-2A, имеющие пространственное разрешение в 10 м. Снимки были получены с помощью инструмента для работы со спутниковыми данными EOS LandViewer [3].

Для проведения идентификации параметров поверхностных вод выбран зеленый, 3-й канал электромагнитного излучения с длиной волны в 0,560 мкм, так как на данной длине волны наблюдается наибольшая корреляция показателей коэффициента яркости с концентрацией взвешенных веществ.

Информация DN (Digital Number), получаемая со спутника, не пригодна для дешифрования. На первом этапе производится радиометрическая калибровка изображения, направленная на устранение влияния внешних факторов путем конвертации значений яркости исходного изображения в показатели излучения на сенсоре [4].

Для выбранного спутника Sentinel калибровка производится по следующей формуле

$$rToa = DN\_band / QUANTIFICATION\_VALUE,$$

где rToa – радиометрическая калибровка снимка; DN_band – канал снимка; QUANTIFICATION_VALUE – поправочный коэффициент.

Поправочный коэффициент находится из прилагающихся к аэрофотоснимку файла метаданных.

Коррекция проводилась в программной среде ArcGIS с помощью инструмента «калькулятор растра». Использование программной среды ArcGIS обусловлено простотой и функциональностью, но может быть заменен аналогичным средством, позволяющим пересчитывать значения пикселей растрового изображения. После коррекции получается изображение, каждый пиксель которого представляет собой коэффициент спектральной яркости (КСЯ).

Также в ходе коррекции проведена атмосферная коррекция, исключающая влияние облаков и дымки, и вырезан окружающий участок суши, который в исследовании не участвует.

Методика дешифрования аэрофотоснимков предполагает нахождение зависимости между концентрацией веществ в воде и значениями КСЯ в данной точке. С данной целью приведены примерные точки отбора проб с предполагаемыми концентрациями загрязняющих веществ. Данные точки были нанесены как отдельный слой на карту и в местах пересечений точек и исходной карты вычислены показатели КСЯ (рис. 1). Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Соотношение результатов определения концентрации взвешенных веществ и значений КСЯ

№ точки	Концентрация взвешенных веществ, мг/л	Значение КСЯ, Вт/(м^2 ср·мкм)
5	2	285
1	2	290
6	4	320
2	6	371
4	8	428
0	10	454
3	12	498

На следующем этапе построен график зависимости концентрации взвешенных веществ от значений КСЯ, построена линия тренда и выведена формула для полученного графика (рис. 2).

Пересчитав значение каждого пикселя обработанного аэрофотоснимка по полученной формуле зависимости концентрации взвешенных веществ от показателей КСЯ, получено следующее изображение, каждый пиксель которого характеризует концентрацию взвешенных веществ в мг/л (рис. 3).

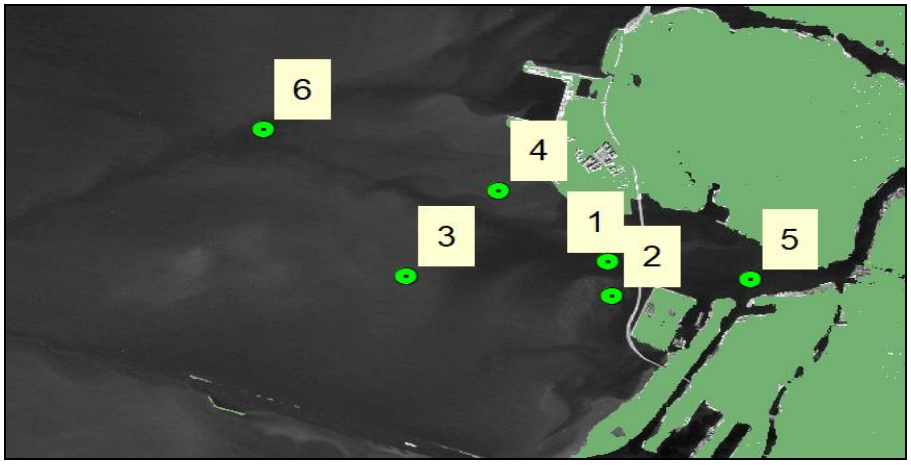


Рис. 1. Точки отбора проб
Fig. 1. Sampling points

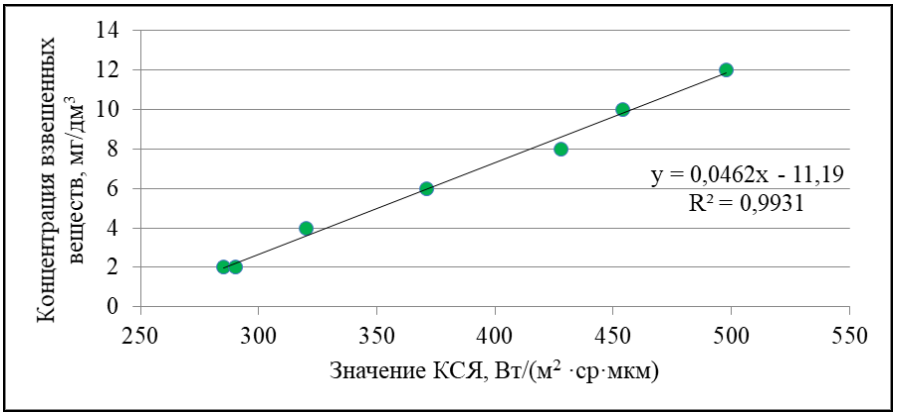


Рис. 2. График зависимости коэффициента яркости от концентрации взвешенных веществ
Fig. 2. Graph of the dependence of the brightness coefficient on the concentration of suspended solids

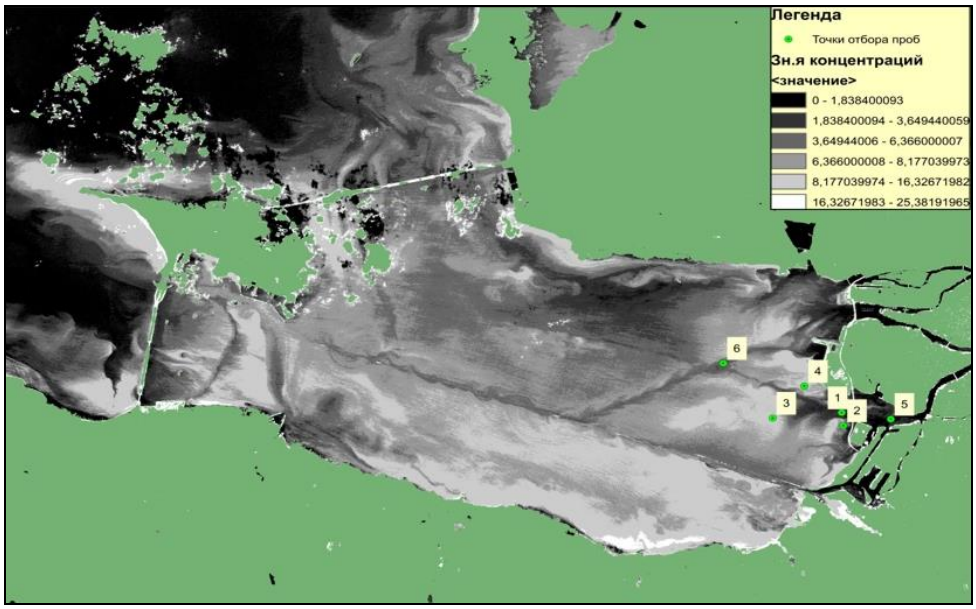


Рис. 3. Результат дешифровки аэрофотоснимка с распределением концентрации взвешенных веществ
Fig. 3. The result of decryption of aerial photographs with the distribution of the concentration of suspended substances

Полученная формула индивидуальная для каждого водного объекта ввиду различия геоморфологических характеристик водоема.

Применение данной формулы в последующем позволит дистанционно определять концентрацию взвешенных веществ данной акватории только по данным аэрофотосъемки, без отбора проб воды.

Применение БПЛА при реализации данной методики позволяет значительно повысить точность измерения и делает возможным исследование небольших водоемов, анализ показателей в которых из-за низкой разрешающей способности спутниковых снимков невозможен.

Достигается это за счет низкой высоты полета БПЛА над водоемом, вариация значения которой позволяет получать аэрофотоснимки любого разрешения. Также полет ниже уровня облаков позволяет производить анализ в облачную погоду, что является невозможным при космическом зондировании и отпадает необходимость атмосферной коррекции изображений, так как небольшой слой воздуха не оказывает мешающего воздействия на получаемые снимки.

Обоснование применения БПЛА для оценки качества поверхностных вод. Использование рассмотренных методов дешифровки и предложенной методики с применением БПЛА, оборудованным мультиспектральной камерой, позволит в оперативном режиме провести анализ широких площадей за короткое время [5].

Аналоговая камера делает возможным вывод информации о полёте на видеозапись для последующего анализа параметров расположения по координатам GPS.

С помощью гиперспектральной съёмки можно определять спектральные характеристики объекта за счёт его отражающей способности в каждом пикселе изображения, обнаруживать объекты по их физико-химическому составу, идентифицировать видовой состав и состояние растительного покрова, определять геологическую структуру, выявлять химический состав воды и многое другое.

Технические средства и комплект сменной исследовательской аппаратуры, устанавливаемые на БПЛА, характеризуют полезную нагрузку, которая зави-

сит от технических характеристик БПЛА.

Для достижения целей данной работы выбран беспилотный летательный аппарат, относящийся к типу квадрокоптеров. Квадрокоптер (от англ. quadcopter – «вертолет с четырьмя винтами») – это беспилотный летательный аппарат, приводимый в движение четырьмя пропеллерами. В настоящее время квадрокоптеры получили широкое применение во многих отраслях, от фото- и видеосъемки до проведения спасательных операций.

Преимуществами применения квадрокоптеров является дешевизна, простота в управлении и широкий спектр возможностей применения. Применение квадрокоптеров позволяет обследовать значительные площади за короткий срок с минимальными финансовыми и физическими расходами [6].

Квадрокоптер имеет несущую раму диаметром 700 мм, на который установлены бесколлекторные двигатели с высоким крутящим моментом «TAROT 4008 Martin Motors». В настоящее время это одни из самых эффективных двигателей подобного типоразмера. Так, с установленным пропеллером в 15 дюймов, при напряжении 24 В и потреблении 3,33 А, двигатель имеет эффективность 12,32 г/Вт, что является очень хорошим показателем у подобных двигателей.

В качестве полетного контроллера установлена автопилотная система «Pixhawk» версии 2.4.8. Данная система поддерживает большой перечень периферийного оборудования, необходимого для целей дистанционного экологического мониторинга.

К полетному контроллеру подключены:

– система GPS позиционирования «Ublox neo-8m», позволяющая фиксировать квадрокоптер в пространстве с погрешностью примерно 20 см;

– система телеметрии «3DR Telemetry 433Mhz» для передачи полетных данных с контроллера на наземную станцию;

– система радиоуправления квадрокоптером «Flysky fs-i6s», которая управляет движением квадрокоптера в пространстве посредством передачи команд с наземной аппаратуры на полетный контроллер на частоте 2,4 ГГц;

– система видеопередачи, с комплексом OSD, для передачи видеоизображения с курсовой камеры квадрокоптера на наземную станцию по каналу связи с частотой 5,8 ГГц.

В качестве наземной станции может быть использован ноутбук или мобильный телефон с поддержкой OTG периферии, к которым подключаются модули видеопередачи и телеметрии. Также в наземную станцию входит аппаратура управления квадрокоптером фирмы Flysky, которая позволяет в режиме реального времени контролировать перемещение квадрокоптера в пространстве.

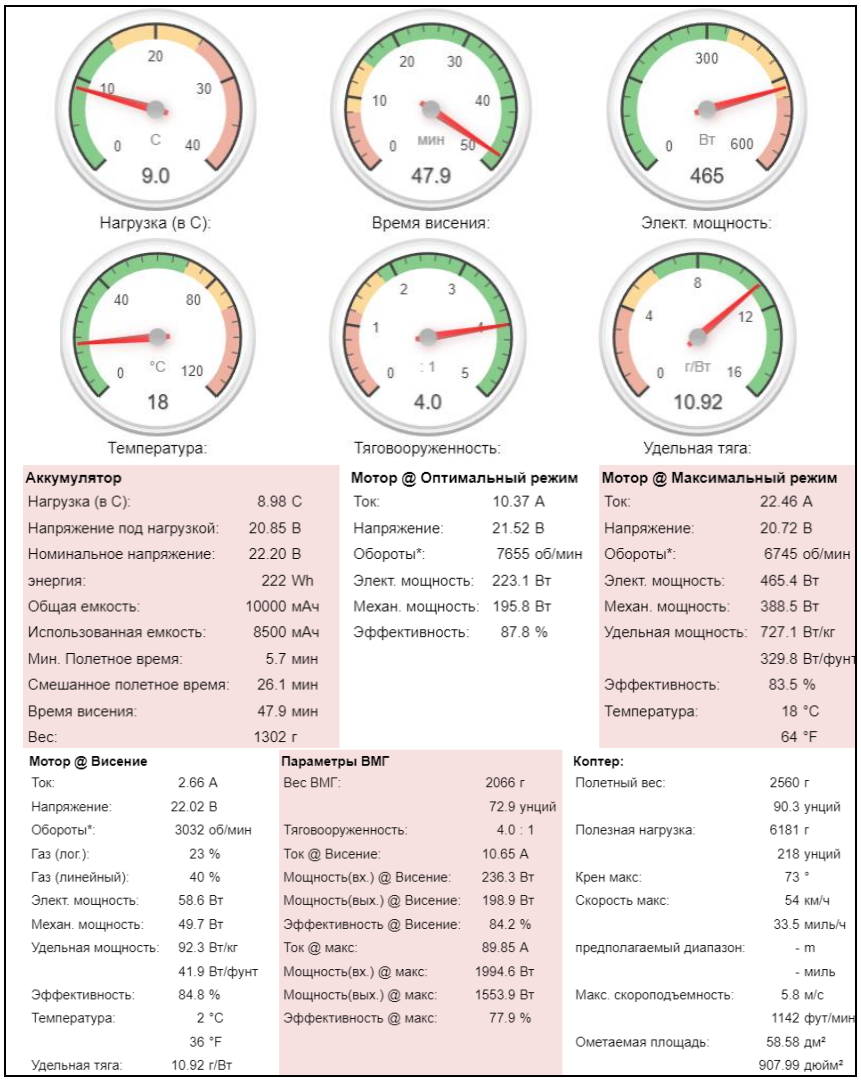
Выбранная беспилотная система обладает лучшими летными характеристиками по сравнению с подобными аппаратами. С установленной камерой квадрокоптер способен преодолевать до 8000 м со скоростью 30 км/ч (рис. 4 и 5) [7].

В свободном висении квадрокоптер способен держаться до 50 мин, а максимальная скорость составляет до 60 км/ч, также имеется возможность подвешивания дополнительного оборудования весом до 3 кг к квадрокоптеру.

Электропитание квадрокоптера обеспечивает аккумулятор «GensaceTattu» с характеристиками напряжения 22,4 В, токоотдачей 250 А, и емкостью 10000 мА/ч.

В качестве фото-видео записывающего оборудования применяется камера «GoPro HERO 6 Black Edition» с разрешающей способностью 16 Мп.

В работе проведен дистанционный анализ с использованием комплекса записывающих устройств поверхности Ладожского озера рядом с целлюлозным заводом г. Питкяранты. Комплекс состоит из 3-х видеозаписывающих камер.



Аккумулятор	
Нагрузка (в С):	8.98 C
Напряжение под нагрузкой:	20.85 В
Номинальное напряжение:	22.20 В
энергия:	222 Wh
Общая емкость:	10000 мАч
Использованная емкость:	8500 мАч
Мин. Полетное время:	5.7 мин
Смешанное полетное время:	26.1 мин
Время висения:	47.9 мин
Вес:	1302 г

Мотор @ Оптимальный режим	
Ток:	10.37 A
Напряжение:	21.52 В
Обороты*:	7655 об/мин
Элект. мощность:	223.1 Вт
Механ. мощность:	195.8 Вт
Эффективность:	87.8 %

Мотор @ Максимальный режим	
Ток:	22.46 A
Напряжение:	20.72 В
Обороты*:	6745 об/мин
Элект. мощность:	465.4 Вт
Механ. мощность:	388.5 Вт
Удельная мощность:	727.1 Вт/кг
	329.8 Вт/фунт
Эффективность:	83.5 %
Температура:	18 °C
	64 °F

Мотор @ Висение	
Ток:	2.66 A
Напряжение:	22.02 В
Обороты*:	3032 об/мин
Газ (лог.):	23 %
Газ (линейный):	40 %
Элект. мощность:	58.6 Вт
Механ. мощность:	49.7 Вт
Удельная мощность:	92.3 Вт/кг
	41.9 Вт/фунт
Эффективность:	84.8 %
Температура:	2 °C
	36 °F
Удельная тяга:	10.92 г/Вт

Параметры ВМГ	
Вес ВМГ:	2066 г
	72.9 унций
Тяговооруженность:	4.0 : 1
Ток @ Висение:	10.65 A
Мощность(вх.) @ Висение:	236.3 Вт
Мощность(вых.) @ Висение:	198.9 Вт
Эффективность @ Висение:	84.2 %
Ток @ макс:	89.85 A
Мощность(вх.) @ макс:	1994.6 Вт
Мощность(вых.) @ макс:	1553.9 Вт
Эффективность @ макс:	77.9 %

Коптер:	
Полетный вес:	2560 г
	90.3 унций
Полезная нагрузка:	6181 г
	218 унций
Крен макс:	73 °
Скорость макс:	54 км/ч
	33.5 миль/ч
предполагаемый диапазон:	- m
	- миль
Макс. скороподъемность:	5.8 м/с
	1142 фут/мин
Ометаемая площадь:	58.58 дм²
	907.99 дюйм²

Рис. 4. Летные характеристики квадрокоптера
Fig. 4. Flight characteristics of the quadcopter

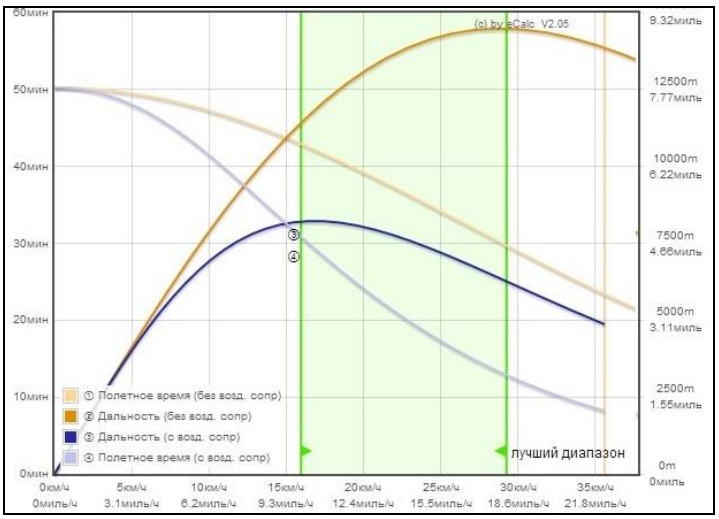


Рис. 5. Летные характеристики квадрокоптера при различных полетных условиях
Fig. 5. Flight characteristics of the quadcopter under various flight conditions

- Инфракрасная камера Seek Thermal XR необходима для идентификации тепловых пятен сточных вод в водном объекте.
- Экшн-камера GoPro HERO 6 Black edition предназначена для видеофиксации поверхности водного объекта в высоком разрешении, для последующего совмещения с изображением от инфракрасной камеры.
- Аналоговая камера Caddix Turtle необходима для передачи картинки с БПЛА на наземную станцию и содержит информацию о состоянии и текущем местоположении БПЛА.

В результате дистанционного исследования получено несколько видеозаписей, содержащих необходимые данные.

На рис. 6 представлено совмещенное изображение с инфракрасной и цифровой камеры, где можно заметить четкий тепловой след от источника рассеивающего сброса сточных вод, что говорит о нахождении в данной зоне источника сброса сточных вод с температурой, отличающейся от температуры воды озера.

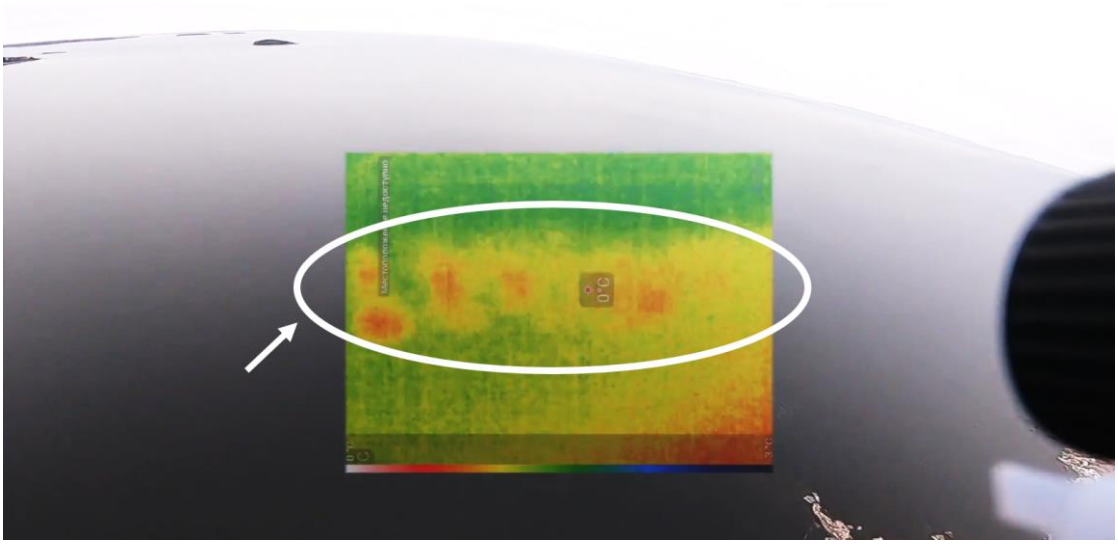


Рис. 6. Совмещенное изображение с тепловым следом от рассеивающего глубинного выпуска сточных вод
Fig. 6. Combined image with a thermal trace from a dissipating deep wastewater discharge

На картинке инфракрасного спектра чётко прослеживается градиент температур между сушей и озером.

Стрелкой на рис. 6 обозначена область распространения сточных вод глубинного рассеивающего выпуска целлюлозного завода г. Питкяранта. Таким образом, с помощью дистанционного анализа выявлено расположение, характер и направление распространения сточных вод в озере.

Проведенные исследования показали, что дроны, оснащенные контрольно-измерительным оборудованием, способны быстро и точно определять необходимые показатели исследуемых объектов, что позволяет быстро и в реальном времени принимать управленческие решения.

Камера высокого разрешения протестирована на двух используемых дронах. Ограничивающим фактором при практическом использовании таких камер является вес камеры, поскольку грузоподъемность используемого вертолета ограничена. Полученные результаты определяют необходимость дальнейшего выбора камер более высокого разрешения с компактным форм-фактором и меньшим весом.

Заключение. Проведенные исследования показали высокую результатив-

ность применения предложенной в работе методики определения концентраций загрязняющих веществ в природных водах с помощью дистанционных методов. Преимуществами применения БПЛА при проведении дистанционного мониторинга водных объектов является оперативность и точность результатов мониторинга. Высокая точность по сравнению со спутниковыми мультиспектральными снимками достигается как за счет отсутствия мешающего влияния облаков и водяного пара между камерой и водной поверхностью, так и за счет большего пространственного разрешения получаемых снимков. Возможность аэрофотосъемки с низких высот позволяет повысить пространственное разрешение до 1 см на пиксель, что повышает точность результатов измерения и минимизирует мешающее влияние толщи атмосферного воздуха, в то время как разрешение спутниковых мультиспектральных снимков составляет 20 м на пиксель, что делает исследование малых водоемов затруднительным. Данный фактор особенно актуален для небольших источников загрязнения, на которых применение спутниковых и аэрофотоснимков, и снимков с самолетов является невозможным. Высокая оперативность мониторинга обусловлена минимальными техническими требованиями для развертывания и запуска системы. Ограничения применимости системы могут быть обусловлены региональными особенностями исследуемой местности, так как полеты БПЛА вблизи аэродромов и военных баз запрещены и климатическими особенностями, связанными с высокой скоростью ветра (больше 10 м/с), затрудняющими полет квадрокоптеров, особенно малогабаритных.

Применение комплекса камер при проведении исследований необходимо для обеспечения наибольшей информативности получаемых изображений, так как по отдельности полученные данные, например, с инфракрасной камеры невозможно использовать без геопривязки по координатам с аналоговой камеры.

Использованная в работе модель БПЛА дает возможность проводить рекогносцировочные и аналитические исследования поверхностных водных объектов с высокой точностью и оперативностью, а также позволяет сократить трудовые и временные затраты, связанные с отбором проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юрак В.В., Малышев А.Н, Завьялов С.С.* Обзор новых дистанционных способов экологического мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 11-1. С. 51–67.

2. *Курагин А.В., Колесенков А.Н., Таганов А.И.* Эволюционный подход к задаче дистанционного экологического мониторинга опасных объектов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сборник трудов II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. 2019. С. 199–203.

3. Спутниковые данные для решения глобальных проблем. URL: https://eos.com/ru/products/landviewer (дата обращения: 15.12.2023).

4. Атмосферная коррекция по методу DOS. URL: https://gis-lab.info/qa/atcorr-dos.html (дата обращения: 15.12.2023).

5. *Барабанова Е.А., Вытовтов К.А., Гладких Т.Я., Мигачев А.Н.* Экологический мониторинг загрязнений водной поверхности в видимом диапазоне с использованием БПЛА // Физические основы приборостроения. 2022. Т. 11. № 4 (46). С. 60–67.

6. *Танчило С.Е., Григорьев Д.О.* Применение квадрокоптера при экологическом мониторинге земель // Интеллектуальный потенциал Сибири: сборник науч. трудов 31-й Региональной науч. студенческой конф. в 7 ч. (Новосибирск, 22–26 мая 2023 г.). 2023. С. 149–151.

7. Калькулятор для Мультикоптеров. URL: https://ecalc.ch/xcoptercalc.php (дата обращения: 15.12.2023).

METHODS AND MEANS OF REMOTE IDENTIFICATION OF WATER QUALITY INDICATORS IN A WATER BODY USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

I.A. Shishkin[1], Kh.O. Barkhkhuev[2], N.A. Zhilnikova[1], A.A. Berezina[1], V.O. Smirnova[1]

[1]Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
RF, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 67
[2]Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher school of technology and energy, RF, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 18

The article discusses methods for remote measurement of individual characteristics of water quality in natural reservoirs. The possibility of their implementation for assessing surface waters quality using unmanned aerial vehicles is determined. Assessment of existing remote monitoring tools is carried out. The use of a complex of video capture systems for remote recognition of water pollution sources is justified. Method for determining pollutants concentrations in natural waters using remote methods is proposed. Research was carried out in dispersive water outlet of pulp production, results of which showed the high efficiency of using drones when conducting remote monitoring of water bodies. Unmanned aerial vehicle of the quadcopter type capable of carrying a payload in form of multispectral cameras, samplers, hydrological probes and allowing monitoring of water bodies remotely is proposed. This innovative tool represents a significant advance in environmental monitoring and allows for more efficient monitoring and management of water resources. This article justifies the use of unmanned aerial vehicles to assess surface waters quality. Advantages of their using and development prospects in conducting research of water bodies are considered.

Keywords: remote monitoring, unmanned aerial vehicle, water quality, water body, drone, environmental control, environmental monitoring.

REFERENCES

1. *Jurak V.V., Malyshev A.N., and Zav'jalov S.S.* Obzor novyh distancionnyh sposobov jekologicheskogo monitoring (Review of new remote methods of environmental monitoring). *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*, 2022, No. 11-1, pp. 51–67.

2. *Kuragin A.V., Kolesenkov A.N.,and Taganov A.I.* Jevoljucionnyj podhod k zadache distancionnogo jekologicheskogo monitoringa opasnyh ob"yektov (An evolutionary approach to the problem of remote environmental monitoring of hazardous objects). *Sovremennye tehnologii v nauke i obrazovanii - STNO-2019. II mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo foruma:* 2019, pp. 199–203.

3. https://eos.com/ru/products/landviewer (December 15, 2023).

4. https://gis-lab.info/qa/atcorr-dos.html (December 15, 2023).

5. *Barabanova E.A., Vytovtov K.A., Gladkih T.Ja., Migachev A.N.* Jekologicheskij monitoring zagrjaznenij vodnoj poverhnosti v vidimom diapazone s ispol'zovaniem BPLA (Environmental monitoring of water surface pollution in the visible range using UAV). *Fizicheskie osnovy priborostroenija*, 2022, Vol. 11, No. 4 (46), pp. 60–67.

6. *Tanchilo S.E., Grigor'ev D.O.* Primenenie kvadrokoptera pri jekologicheskom monitoringe zemel' (Application of a quadcopter in environmental monitoring of lands). *Intellektual'nyj potencial Sibiri. 31-j Regional'noj nauchnoj studencheskoj konferencii. Novosibirsk*, 2023, pp. 149–151.

7. https://ecalc.ch/xcoptercalc.php (December 15, 2023).