

## **Обнаружение беспилотных летательных аппаратов: существующие решения и возможности**

Н.П. Красненко<sup>1,2</sup>, А.Я. Богущевич<sup>1</sup>, С.А. Кураков<sup>1</sup>, А.С. Раков<sup>1</sup>, И.А. Рыбаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.*

*E-mail: [krasnenko@imces.ru](mailto:krasnenko@imces.ru)*

<sup>2</sup> *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

*Рассматриваются проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Дан обзор имеющихся материалов по анализу возможностей обнаружения БПЛА средствами радиолокационной, радио- и радиотехнической, оптико-электронной и акустической разведок. Основное внимание уделено акустическим методам обнаружения малоразмерных малоскоростных низколетящих дронов. Представлены результаты экспериментов по исследованию возникающих атмосферных возмущений и акустических признаков при полете квадрокоптеров. Рассматриваются возможности пассивного и активного обнаружения. Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, акустика, обнаружение малоразмерных низколетящих дронов*

## **Detection of unmanned aerial vehicles: existing solutions and possibilities**

N.P. Krasnenko<sup>1,2</sup>, A.Ya. Bogushevich<sup>1</sup>, S.A. Kurakov<sup>1</sup>, A.S. Rakov<sup>1</sup>, I.A. Rybakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS.*

<sup>2</sup> *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.*

*Problems of detecting unmanned aerial vehicles (UAV) are considered. The review of available materials on analysis of possibilities for the UAV detection using radar, radio, radio engineering, optoelectronic, and acoustic reconnaissance are considered. Attention is focused on acoustic methods of detecting small-size low-speed low-flying drones. Results of experiments on the study of atmospheric perturbations and acoustic features created by flying quadcopters have been presented. Possibilities of passive and active detection are considered. Keywords: unmanned aerial objects, multicopter, acoustics, detecting small-size low-flying drones*

## **Введение**

Применение беспилотных летательных аппаратов получило бурное развитие в последнее время в гражданских и, особенно, в военных целях. В связи с этим весьма актуальной стала проблема обеспечения безопасности территорий и отдельных объектов от действий БПЛА. Первым этапом противодействия таким атакам является своевременное обнаружение БПЛА и это является большой проблемой [1-9]. Если достаточно высоколетящие большие БПЛА самолетного типа своевременно обнаруживаются современными средствами ПВО, то малоразмерные малоскоростные и низколетящие БПЛА (это в основном мультикоптеры) являются достаточно сложными целями [1, 2, 10-15]. Ситуация усугубляется применением в конструкции БПЛА материалов, имеющих слабую отражательную способность для их обнаружения активными радиосредствами ПВО.

Построение систем обнаружения основано на использовании демаскирующих признаков БПЛА. Они, в частности, были рассмотрены в работах [1-3 и др.]. Помимо

радиоизлучения для управления и связи, БПЛА имеет оптическую видимость, обладает отражательной способностью, возмущает среду – атмосферу и создает акустический шум за счет работы двигателя и пропеллеров. Последние эффекты широко используются для обнаружения, особенно акустические [15-26] и являются объектом нашего исследования для возможного использования при построения системы обнаружения [2].

Целью данного обзорного доклада является рассмотрение демаскирующих признаков БПЛА, анализ существующих средств и возможностей обнаружения малоразмерных малоскоростных низколетящих объектов для разработки эффективных систем их обнаружения и идентификации.

### **Демаскирующие признаки и методы обнаружения**

Анализ демаскирующих признаков БПЛА для их обнаружения достаточно хорошо представлен [1, 7]. Обнаружение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) может осуществляться различными активными и пассивными средствами. В зависимости от целей, технических возможностей и условий задачи это:

- средства радиолокационной разведки (РЛР) – различные РЛС;
- средства радио- и радиотехнической разведки (РРТР) – станции контроля радиоизлучений, пеленгаторные посты;
- средства теле- и видеонаблюдения в видимом и инфракрасном диапазонах (ОЭР);
- средства акустической разведки (АР – микрофоны и звукоулавливатели).

Данные средства целесообразно использовать совместно, т.к. они взаимно дополняют друг друга.

При этом основными средствами целеуказания для комплексов ПВО являются средства РЛР-РЛС, а для комплексов радиоэлектронного подавления (РЭП) – средства РРТР. Общие недостатки применения активных радиосредств обнаружения заключаются в характеристиках объекта обнаружения: малые размеры, малая отражаемость, малая скорость полета, низкая высота полета. Также существует ограниченная способность идентификации объекта обнаружения. При создании зоны покрытия возникают проблемы электромагнитной помехоустойчивости, высокого энергопотребления, стоимости.

Оптические пассивные методы наблюдения обладают высокой разрешающей способностью, что позволяет видеть и идентифицировать БПЛА. Их недостатком являются требования к хорошей видимости в атмосфере и открытости трассы наблюдения. Ограничения по всепогодности, времени суток, серьезно влияют на дальность обнаружения объекта. Применение активных лазерных локационных средств (лидаров) в принципе увеличивает дальность обнаружения, но имеются проблемы при поиске объекта обнаружения в пространстве и засветки (помехи) в дневное время при солнечной погоде.

Акустические пассивные методы обнаружения работают по приходящим звуковым сигналам от БПЛА. Публикуемая дальность обнаружения от десятков метров до примерно километра. Они особенно полезны для обнаружения малоразмерных и низколетящих (зависающих) мультикоптеров в условиях плохой видимости. Их стоимость существенно ниже радарной. Целесообразно создание сети таких обнаружителей. К недостаткам относится зависимость дальности обнаружения от атмосферных условий распространения звука (прежде всего ветра, но и мультикоптеры при сильных ветрах не летают). Также влияют посторонние шумы.

### **Сравнительные характеристики методов и средств обнаружения**

В таблице 1 дана оценка возможностей различных средств обнаружения

малоразмерных БПЛА [1].

**Таблица 1 – Возможности различных типов средств разведки при решении задач обнаружения, идентификации и сопровождения БПЛА**

Характеристика	Радио		Оптические			Акустические
	Средства РЛС	Средства РРТР	Средства ОЭР в видимом диапазоне	Средства ОЭР в ИК-диапазоне	Лазерные средства	Средства АР
Обнаружение в дневное время	+	+	+	–	+	+
Обнаружение в ночное время	+	+	–	+	+	+
Обнаружение в условиях естественных помех	+	+	+	+	+	+
Обнаружение БПЛА среди естественных объектов (прежде всего – птиц)	–	+	–	–	–	±
Обнаружение в сложных погодных условиях	±	+	–	–	–	–
Идентификация БПЛА	–	+	±	±	–	+
Селекция одиночных и групповых целей	+	+	+	+	+	+
		(по различным каналам)				(для БПЛА различных типов)
Сопровождение и формирование траектории	+	+	+	+	+	+
		(для многопозиционной системы)				(для многопозиционной системы)
Дальность действия	высокая	высокая	средняя	средняя	средняя	низкая

Стоит отметить, что дальность обнаружения зависит от многих факторов, таких как внешние погодные условия, модель и массогабаритные характеристики летательного аппарата, высота его полета над землей и др. Поэтому цифры в строке по дальности носят довольно субъективный характер, взяты из различных источников и получены для различных аппаратов при различных условиях проведения измерений.

#### **Акустические методы обнаружения**

Касаясь акустических методов необходимо сказать, что еще в прошлом веке для обнаружения самолетов достаточно эффективно использовались звукоулавливатели.

Дальность обнаружения самолетов была до нескольких километров и больше. С развитием систем радиолокации, обладавших большей дальностью и точностью обнаружения, от них отказались. Тем не менее в настоящее время акустические системы развиваются, претерпевают второе рождение и имеют дальнейшие перспективы по их использованию для обнаружения малоразмерных низколетящих БПЛА [7-13]. Они напрямую связаны с машинным обучением и внедрением нейронных сетей, а также разработкой алгоритмов для более детальной обработки акустических сигнатур в приемной части системы. Всё это в совокупности может повысить вероятность обнаружения и идентификации объекта на фоне шумов окружающей среды.

Акустическая сигнатура дрона зависит от различных факторов, таких как размеры, конструкция, тип привода и настройки двигателя. Влияние этих факторов на акустическую сигнатуру и возможные способы анализа этой информации для обнаружения дронов рассмотрены в работах [1, 7, 10].

В качестве примера работы акустических систем, рассмотрим исследования проведенные в работе [9], где использовались два типа БПЛА: Phantom 4 массой 1,3 кг (рис. 1,*а*) и более крупный съёмочный M600 массой 9,6 кг (рис. 1,*б*), а также две акустических системы для их обнаружения: DADS и OptiNav.



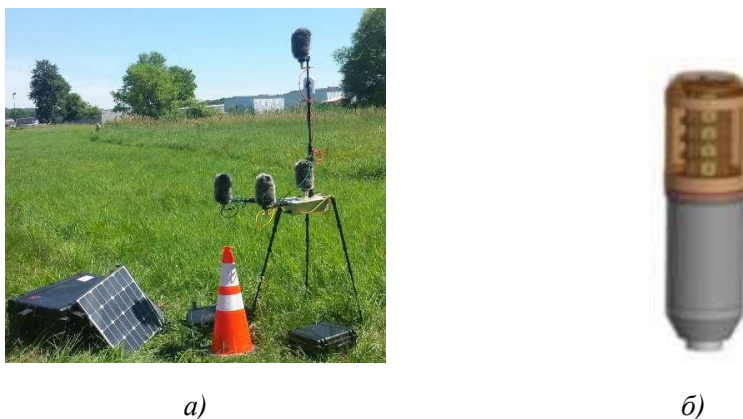
*а)*



*б)*

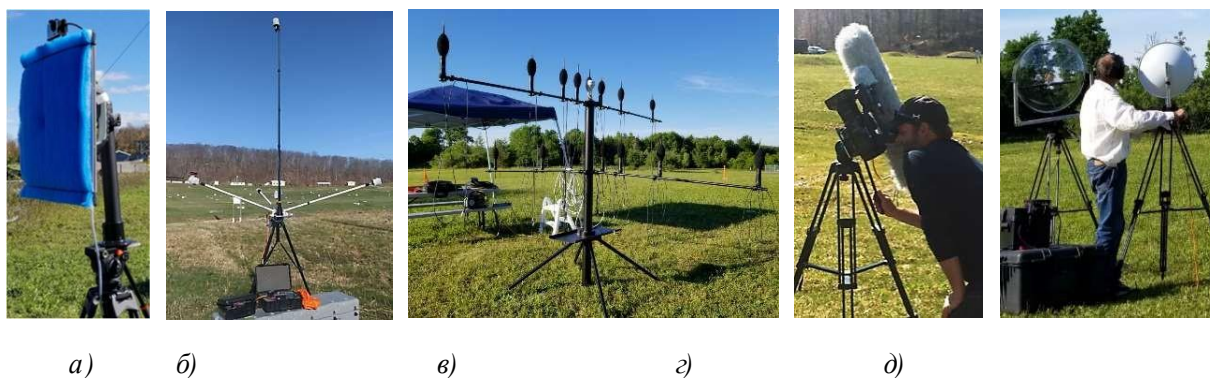
**Рис. 1. Исследуемые модели БПЛА: квадрокоптер Phantom 4 (*а*) и гексакоптер M600 (*б*)**

На рис. 2,*а* показан один из комплектов многопозиционной системы DADS для обнаружения и пеленгования БПЛА на основе приема и обработки приходящего шума пропеллеров. Аудиоданные используются для классификации сигнатуры, а многопозиционность, которая включает в себя три отдельно расположенных приемника, обеспечивает локализацию БПЛА в пространстве в режиме реального времени. Оцифрованные акустические сигналы со всех микрофонов по беспроводной сети передаются на центральный компьютер, где осуществляется обработка сигналов для обнаружения, отслеживания и классификации БПЛА. Система оснащена специально изготовленными микрофонами (рис. 2,*б*). Собираются данные с четырех микрофонов, передаются в компьютер, где обрабатываются, отображаются и сохраняются. Микрофоны расположены в виде тетраэдра с регулируемым расстоянием (при испытаниях сторона решетки была выбиралась равной 53 см). Среднее расстояние между узлами системы было 80-120 м.



**Рис. 2. Одиночный узел системы акустического обнаружения дронов DADS (а),  
единичный микрофон системы (б)**

Акустическая решетка системы OptiNav (рис. 3,а) имеет 40 микрофонов на пластине размером 40 х 40 см. Также на рисунке 3 показаны и другие акустические системы обнаружения. Так на рис. 3,б показана установка акустических регистраторов, состоящая из 5 микрофонов, расположенных в пирамидальной конфигурации. На рисунке 3,в приведена акустическая двухъярусная перекрестная решетка. На рис. 3,г показано совместное использование направленного микрофона (Rode NTG8) с видеокамерой, что обеспечивало одновременную запись звука и видеoinформации с заданного направления. На рисунке 3,д показаны два параболических направленных микрофона: на антенне COTS (JonyShot 24 дюйма) и изготовленного из металлического отражателя.



**Рис. 3. Системы акустического обнаружения: OptiNav (а), пирамидальная акустическая система (б), двухъярусная перекрестная решетка (в), направленный микрофон с видеокамерой (г), параболические направленные микрофоны (д)**

Результаты испытаний по обнаружению двух типов мультикоптеров: гексакоптера M600 и квадрокоптера Phantom 4 различными акустическими системами приведены в таблице 2 [9]. Из приведенных данных сложно судить о влиянии атмосферы на характеристики обнаружения. Только видно, что чем меньше уровень внешнего шума, тем, естественно, больше дальность обнаружения. Но даже обнаружение коптеров на таких относительно небольших дальностях в сотни и десятки метров является весьма актуальной задачей. Точность пеленгации коптеров получается высокая.

**Таблица 2 – Результаты испытаний систем обнаружения БПЛА**

Условия испытаний	Система акустического обнаружения	Модель коптера	Точность определения направления, град	Дальность обнаружения, м
Ветер 2-6 м/с Температура 24°C Относительная влажность 50% Шум 60-71 дБА	DADS	M600	1.2	130
		Phantom 4	1.6	85
	OptiNav	M600	1.9	170
		Phantom	1.5	105
Ветер 2-5 м/с Температура 32 °С Солнечно Шум 52-60 дБА	DADS	M600	1	300
		Phantom 4	3.2	155
	OptiNav	M600	1.5	255
		Phantom 4	2.2	130

Имеются и другие акустические системы промышленного производства для обнаружения БПЛА. Так система Discovair G2 (рис. 4) построена на основе массивов (до четырех) из 128 микрофонов (антенных решеток) и может определять азимут и угол места цели в режиме реального времени [11]. В зависимости от типа дрона и уровня звука, обнаружение наблюдалось на расстояниях до 500 м.



**Рис.4. Акустическая система обнаружения дронов Discovair**

Модульная система обнаружения и защиты от БПЛА "DROKA / FEDAI" [12] разработана турецкими компаниями "Havelsan" и "Transvaro". В ней реализованы все основные принципы, используемые сегодня для обнаружения и борьбы с БПЛА. Каждый используемый для обнаружения способ хорош по-своему, но и имеет определенные ограничения. Например, РЛС обеспечивает большую дальность, но её эффективность снижается для малоразмерных целей. ЛИДАР компенсирует этот недостаток, но в пределах меньшей дальности. Поэтому все обнаружители используются комплексно. Возможности этой системы представлены на рис. 5.



**Рис. 5. Возможности комплексной системы обнаружения**

Упомянется разрабатываемая система [13] для обнаружения квадрокоптеров гражданского назначения с массой до 200 г, высотой полета до 100 м. Она реализуется в виде сети микрофонов с защитой от сложных погодных условий, сервера и специализированного программного обеспечения для записи и анализа звуковых сигналов БПЛА с системой оповещения по электронной почте и смс. Размещать систему предполагается по периметру зоны наблюдения. Основная идея состоит в реализации сети таких систем для распознавания звуковых колебаний. Между собой узлы сети могут быть соединены проводным или беспроводным способом в зависимости от конкретных задач и условий. Также возможны различные конфигурации аппаратной части, которые оказывают существенное влияние на дальность работы и требования по погодным условиям.

### **Исследование возмущений при полете квадрокоптеров**

Для исследования демаскирующих эффектов использовались два квадрокоптера: легкий самодельной сборки KSA-1 и более тяжелый Walkera Voyager 3 (рис. 6). KSA-1 имеет расстояние между осями роторов 150 x 200 мм, длину пропеллера 125 мм.



*a)*



*б)*

**Рис.6. Используемые в экспериментах квадрокоптеры: самодельной сборки KSA-1 (a) и Walkera Voyager 3 на земле (б)**

Для оценки возмущений в атмосфере при полете квадрокоптеров использовалась ультразвуковая метеорологическая станция, которая располагалась на крыше пятиэтажного здания и работала в автоматическом режиме. Квадрокоптер пролетал и зависал над ней некоторое время (рис. 7). Частота измерения метеоданных составляла 80 Гц. Определялись средние за интервал измерения метеовеличины: температура воздуха, давление, влажность, три компонента скорости ветра, его направление. Также вычислялись характеристики турбулентности: энергия, потоки тепла и импульса, масштаб Монина-Обухова; структурные постоянные температуры, скорости ветра, показателя преломления оптических волн.

Для измерения спектральных характеристик акустического шума от БПЛА использовался шумомер ЭКОФИЗИКА-110А с установленным измерительным микрофоном М-201 и предусилителем Р200. На расстоянии в 1 м от оси микрофона неподвижно фиксировался квадрокоптер. С помощью пульта управления БПЛА имитировался режим полета вверх длительностью 20 секунд (задавая нагрузку на винты для подъемной силы) и режим спуска длительностью 15 секунд с одновременной аудио записью на шумомер. Результаты спектральных измерений шума отображались с использованием программного обеспечения шумомера.



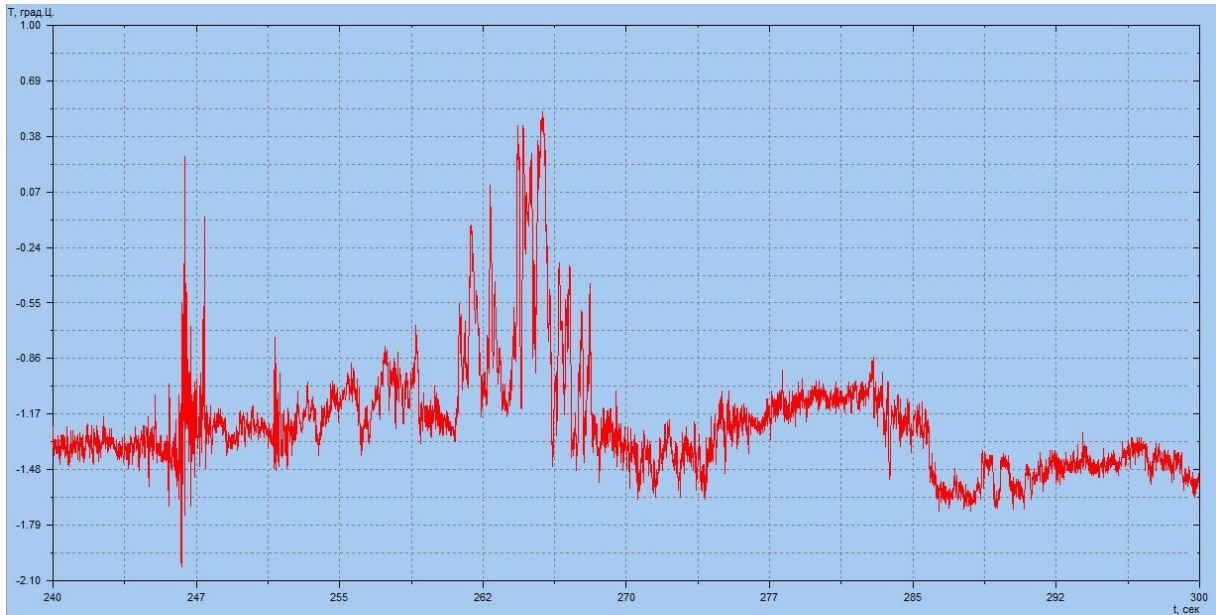
**Рис. 7. Квадрокоптер KSA-1 над ультразвуковой метеостанцией**

Для проверки возможностей пассивного и активного акустического обнаружения БПЛА использовался также моностатический акустический локатор вертикального зондирования [27]. Он находился на измерительной площадке, расположенной на крыше четырехэтажного корпуса института, на высоте 20 метров над землей. Локатор работает на приеме-передающей параболической антенне диаметром 1,6 м до высоты 720 м. В качестве облучателя (и приемника) использовались четыре громкоговорителя (драйвера), синфазно работающие на рупор специальной конструкции. Использовалась несущая частота зондирования 1800 Гц, длительность акустического импульса была 0.15 с, период зондирования 5 с, полоса приемника составляла 300 Гц. Подъем и спуск квадрокоптеров производился вдоль оси диаграммы направленности антенны локатора. При активном режиме локатор работал, осуществляя зондирование атмосферы, а при пассивном выключался усилитель мощности сигнала и локатор работал только на прием, как направленный микрофон.

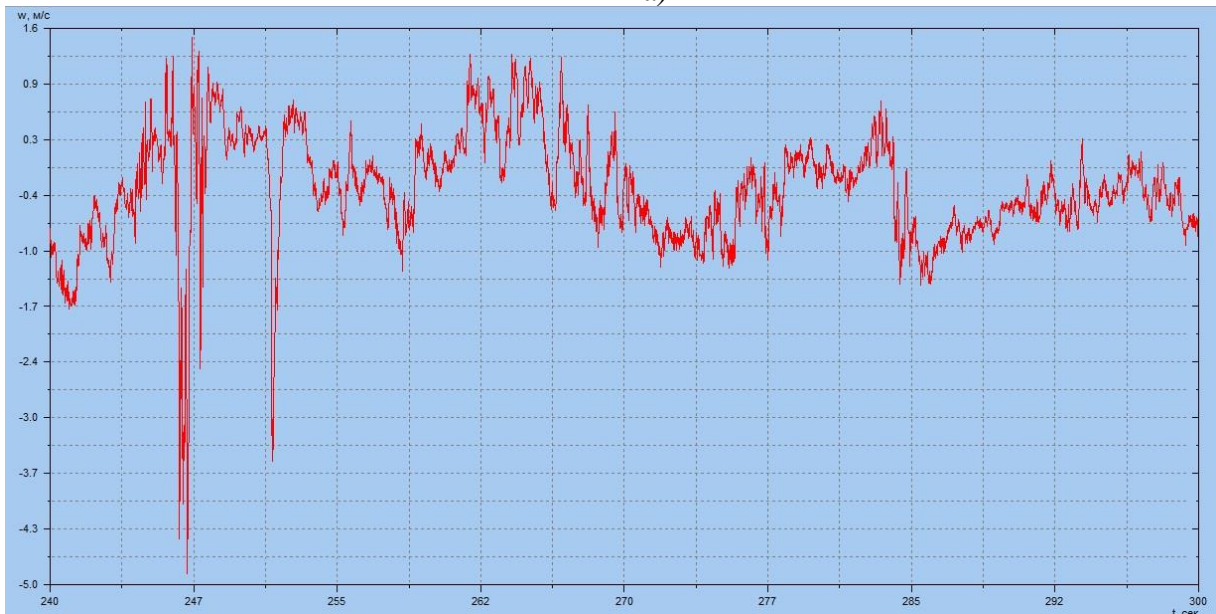


### Результаты исследований

Было проведено три серии экспериментов с квадракоптерами: 16.03.2023, 25.06.2023 и 07.06.2023 г. Измерение атмосферных возмущений проводилось с квадракоптером KSA-1. Ниже приведены некоторые результаты проведенных измерений. Так, например, для 16.03.2023 г., когда утром при полете квадракоптера KSA-1 с 9:50 наблюдалась сильная приземная инверсия, которая примерно с 10:00 начала ослабевать (поворот ветра с юго-запада на запад, возрастание масштаба Мони́на-Обухова  $L$ ), Стандартные отклонения: для температуры  $\sigma_T$  – около 0,4 К; для скорости ветра  $\sigma_V$  – около 0,5 м/с.



a)



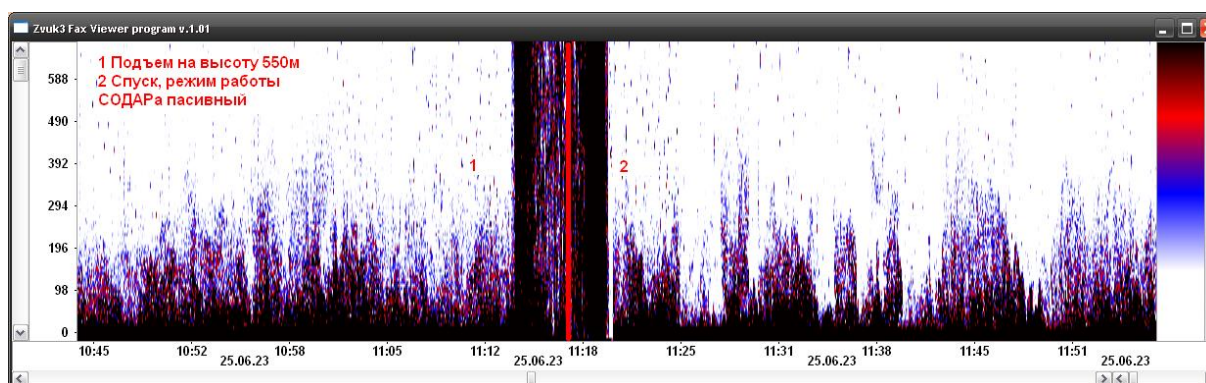
б)

**Рис. 8. Минутные записи (с 10:12 до 10:13) температуры воздуха, °С (а) и вертикальной компоненты скорости ветра, м/с (б)**

На рис. 8 приведены минутные записи с 10:12 до 10:13 мгновенных значений температуры  $T$  и вертикальной компоненты скорости ветра  $w$ . Здесь в районе 247 сек (около 10:12:07) видны возмущения  $T$  и  $w$ , обусловленные близким пролетом дрона.

Результаты измерений показывают, что энергия турбулентности увеличивается в несколько раз. Из структурных характеристик наибольшее изменение происходит у структурной постоянной скорости ветра, которая также увеличивается в несколько раз. Как раз структурные постоянные и определяют величину рассеянного сигнала для различных видов излучений и, соответственно, возможности использования активных видов локации, созданных БПЛА возмущений в атмосфере.

Другие измерения были проведены при полете квадрокоптеров вдоль вертикальной оси диаграммы направленности антенны акустического локатора. Так на рисунке 9 приведен один из примеров эксперимента за 25.06.2023 г. по зондированию атмосферы локатором с фиксацией запуска квадрокоптера Walkera Voyager 3. На фоновой записи локатора наблюдается неустойчивая стратификация атмосферы (перьевая структура, конвективные потоки - термики) до высоты 700 м с 10:45 и до 11:58 местного времени. Примерно с 11:13 до 11:20 осуществлялся полет квадрокоптера до высоты 550 м и спуск. Он выделяется темной полосой (засветкой) во всем интервале высот. Слева от разделительной полосы фиксируется подъем квадрокоптера (локатор работает в активном режиме), справа – спуск квадрокоптера (локатор работает в пассивном режиме, только на прием). Таким образом в данном эксперименте проиллюстрирована возможность обнаружения квадрокоптеров при работе в активном и пассивном режимах до высоты, по крайней мере, в 700 метров.



**Рис. 9. Высотно-временная запись термической структуры атмосферы с запуском квадрокоптера Walkera Voyager 3 до высоты 550 метров. Цвет (яркость) определяет интенсивность принимаемого сигнала (шкала справа)**

### **Заключение**

Приведенные материалы показывают на чрезвычайную важность своевременного обнаружения БПЛА. Целесообразно построение и применение комбинированных активных и пассивных систем обнаружения.

Пассивные акустические средства обнаружения дронов являются более дешевыми. Это делает их более доступными в использовании и позволяет применять для защиты различных объектов и территорий. При правильном построении измерительной сети они могут обеспечить высокую вероятность обнаружения дронов. Что касается меньшей дальности обнаружения, то их ниша - это обнаружение малоразмерных малоскоростных низколетящих объектов, т.е. мультикоптеров. Однако, необходимы дополнительные исследования и эксперименты для оптимизации алгоритмов и разработки промышленных решений. Акустическое обнаружение и идентификация БПЛА с использованием нейронных сетей также должно стать инновационным и перспективным направлением.

Атмосферные возмущения, возникающие при полете БПЛА, могут использоваться как демаскирующие признаки при разработке новых систем лазерной, акустической и радиолокации.

*Работа выполнена в рамках проектов по госзаданию Минобрнауки РФ (№ FWRG-2021-0008 и № FEWM–2023–0014).*

### **Литература**

1. Красненко Н.П., Рыбаков И.А. Проблемы и возможности обнаружения беспилотных летательных аппаратов // Шарыгинские чтения. Пятая Международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, 11-13 октября 2023 г., Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023. С. 5-14.
2. Красненко Н.П., Богушевия А.Я., Кураков С.А., Раков А.С., Рыбаков И.А. Исследование демаскирующих признаков при полете квадрокоптеров для их обнаружения // Шарыгинские чтения. Пятая Международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, 11-13 октября 2023 г., Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023. С. 15-22.
3. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб.: Научное издание, 2020. -240 с.
4. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146.
5. Raed Abu Zitar, Mohammad Al-Betar, M. Ryalat, S. Kassaymeh. A review of UAV Visual Detection and Tracking Methods // arXiv:2306.05089v1 [cs.CV] 8 Jun 2023. 10 p.
6. Florian-Lucian Chiper, Alexandru Martian, Calin Vladeanu, Ion Marghescu, Razvan Craciunescu, Octavian Fratu. Drone Detection and Defense Systems: Survey and a Software-Defined Radio-Based Solution // Sensors. 2022. 22. 1453. 27 p.
7. Ростопчин В.В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/331772628> Udarnye bespilotnye letatelnye apparaty i protivovozdusnaa oborona -problemy i perspektivy protivostoania (дата обращения 20.05.2019).
8. Drone detection – Squarehead Technology. URL: <https://www.sqhead.com/drone-detection/#1539176966676-a49b192e-aa00> (дата обращения 17.09.2023).
9. Yousaf J., Zia H., Alhalabi M., Yaghi M., Basmaji T., Shehhi E.A., Gad A., Alkhedher M., Ghazal M. Drone and Controller Detection and Localization: Trends and Challenges // Appl. Sci. 2022,12, 12612.
10. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. №1. 7 с. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf> (дата обращения: 15.09.2023).
11. Самойлов П.В., Иванов К.А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59-65. - URL: <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (дата обращения 21.09.2019).

12. Митрофанов Д.Г., Шишков С.В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 28-40.
13. Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 29.01.2015. № 6 (14). – URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (дата обращения 11.12.2019).
14. Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. 2014. № 6 (14). –URL: <http://arsenal-otechestva.ru/new/389-antidrone> (дата обращения 11.12.2019).
15. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. Украина. 2018. № 195. С. 235-243.
16. Олейников В.Н., Зубков О.В., Карташов В.М., Корытцев И.В., Бабкин С.И., Шейко С.А., Селезнев И.С. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению // Радиотехника. Украина. 2019. № 199. С. 29-37.
17. Bowon Yang. UAV Detection Systems with Multiple Acoustic Nodes using Machine Learning Models // A Thesis Master Science. Purdue University. West Lafayette. Indiana. USA. May 2019. 49 p.
18. Joel Busset, Florian Perrodin, Peter Wellig, Beat Ott, Kurt Heutschi, Torben Ruhe, Thomas Nussbaumer. Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9647. 96470F. 8 p.
19. Pietro Casabianka, Yu Zhang. Acoustic-Based UAV Detection Using Late Fusion of Deep Neural Networks // Drones. 2021. 5. 54. 14 p.
20. Sedunov A., Haddad D., Salloum H., Sutin A., Sedunov N., Yakubovskiy A. Stevens Drone Detection Acoustic System and Experiments in Acoustics UAV Tracking // Proceedings of the IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), Woburn, MA, USA, 5–6 November 2019; pp. 1–7.
21. Zhiguo Shi, Xianyu Chang, Chaoquu Yang, Zexian Wu, Junfeng Wu. An Acoustic-Based Surveillance System for Amateur Drones Detection and Localization // IEEE Transactions on Vehicular Technology. January 2020. 10 p. DOI: 10.1109/TVT.2020.2964110.
22. Utebaeva D.Z. Research of effective UAV detection using acoustic data recognition // Thesis for the Degree of PhD. Satbayev University. Republic of Kazakhstan. Almaty. 2023. 91 p.
23. Деркачев П.Ю., Косогор А.А., Тихов Ю.И. Акустический способ обнаружения беспилотных летательных аппаратов. Патент РФ. № 2749651 С1. Опубликовано 16.06.2021. Бюл. № 17.
24. Acoustic UAV Detection System. URL: <https://transvaro.com/en/uav-detection-defence-systems/acoustic-uav-detection-system/> (дата обращения 17.09.2023).
25. В России разработали систему быстрого обнаружения дронов. URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/18704067> (дата обращения 17.09.2023).
26. Луценко В.И., Луценко И.В., Соболяк А.В. Дальность действия систем акустической разведки // Прикладная радиоэлектроника: научно-техн. журнал. 2015. Т. 14. № 2. С. 125-136. Харьков: ХНУРЭ.
27. Красненко Н.П. Развитие дистанционных методов и средств изучения нижней атмосферы в ИМКЭС СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 02. С. 98–104.