

Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 437—450.  
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(76):437—450.

Научная статья  
УДК 551.502.2:551.508.822:629.7  
doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-437-450

## **О возможности вертикального зондирования атмосферы при помощи мобильного аэрологического комплекса, размещенного на беспилотном летательном аппарате**

*Валерий Юрьевич Цепелев*

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,  
Россия, v0010200@mail.ru

*Аннотация.* Вертикальное зондирование нижней и средней тропосферы, производимое при помощи датчиков, размещенных на беспилотных летательных аппаратах, позволяет с минимальными затратами увеличить плотность аэрологической наблюдательной сети благодаря использованию стандартного сертифицированного оборудования. При этом измерения параметров атмосферы, выполняемые датчиками, размещенными на БПЛА и на радиозондах, неплохо согласуются. К основным преимуществам использования комплекса зондирования, в который входит БПЛА, радиозонд МРЗ-Н1 и компактный радиосканер приема сигнала вместо радиолокатора, относится возможность проводить дешевые учащенные наблюдения пограничного слоя атмосфер в вертикальном столбе воздуха прямо над точкой зондирования. Стоимость эксплуатации такого комплекса примерно в восемь раз меньше, чем традиционной станции аэрологического зондирования.

*Ключевые слова:* аэрологические наблюдения, радиозонд, беспилотный летательный аппарат, радиосканер.

*Для цитирования:* Цепелев В. Ю. О возможности вертикального зондирования атмосферы при помощи мобильного аэрологического комплекса, размещенного на беспилотном летательном аппарате // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 437—450. doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-437-450.

Original article

## **On the possibility of vertical atmospheric sounding with use of mobile aerological complex placed on an unmanned aerial vehicle**

*Valery Y. Tsepelev*

The Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia, v0010200@mail.ru

*Summary.* The use of small UAVs as a platform for meteorological sensors dates back to the early 1960s, but their introduction into operational practice became possible only when cheap and efficient UAVs appeared on the market. UAVs are not only a flexible tool for atmospheric sensing. Their use is more cheaper, than traditional vertical atmospheric sounding methods. The essential argument of transition to UAV measurements is their economic efficiency. The paper presents the concept of a mass, domestic complex of

vertical atmospheric sounding with help of UAVs, which assumes multiple use of the standard radiosonde MP3-H1, which is a standard, certified measuring instrument used on the state aerological observation network, which has the best characteristics from all used radiosondes of the Rosgidromet observation network. Use RTL-SDR radiosonde to replace the expensive station for signal reception and processing. The use of the radiosonde which complete with freely distributed software, for processing and decoding of the radiosonde signal, and construction of the aerological diagram allows to refuse the use of the expensive base station of the radiosonde system “Polyus” and to use an ordinary laptop or smartphone for receiving and decoding sounding data. The possibility of using serial, certified equipment allows to obtain measurement results with the same accuracy as on the regular observational network. A rough estimate of the cost of operating the complex is about 8 times less than the operating cost of a traditional airborne sounding station.

*Keywords:* atmospheric sounding, radiosonde, Unmanned Aerial platform, radio scanner RTL SDR.

*For citation:* Tsepelev V.Yu. On the possibility of vertical atmospheric sounding with use of mobile aerological complex placed on an unmanned aerial vehicle. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):437—450. (In Russ.). doi: 0.33933/2713-3001-2024-76-437-450.

## Введение

Для получения информации о вертикальных профилях температуры, влажности, скорости, направлении ветра и давлении воздуха в атмосфере до высот 30—40 километров используются радиозонды, которые поднимаются с помощью специальных латексных шаров, наполняемых лёгким газом — водородом или гелием.

Процесс определения пространственных координат радиозонда осуществляется с помощью измерительных систем. Во многих странах мира используются спутниковые навигационные системы зондирования, но на аэрологической сети Росгидромета преобладают системы, основанные на радиолокационном принципе определения координат. К точности радиозондовых измерений предъявляются требования, сформулированные в документах Всемирной метеорологической организации [1]. Так, например, точность датчиков для измерения температуры в нижних слоях тропосферы не должна превышать 0,5 °С, а измерения относительной влажности должны осуществляться с погрешностью не более 1 %.

Аэрологическая сеть Росгидромета в РФ размещена крайне неравномерно (рис. 1). Если на Европейской территории РФ сеть достаточно плотная, то низкая плотность сети в Арктических районах и в Сибири не позволяет получать необходимую информацию о состоянии тропосферы и стратосферы и, соответственно, улучшать качество численных прогнозов погоды.

По состоянию на декабрь 2022 г. в РФ дважды в сутки, в сроки 00 и 12 мирового времени, производились выпуски радиозондов на 114 аэрологических станциях.

В течение года было выпущено 83 220 штук радиозондов, в комплект которых входит как сам радиозонд, так и латексная оболочка. Для обеспечения выпусков радиозондов было добыто примерно полтора миллиона литров водорода. Основные проблемы отечественного радиозондирования перечислены в документе «Программа и качество наблюдений» за 2022 г., выпущенном Центральной Аэрологической Обсерваторией (ЦАО) и размещенном на сайте [http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/stuff/upperair/list\\_upperair.htm](http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/stuff/upperair/list_upperair.htm). Помимо отмеченной недостаточной плотности наблюдательной сети, к этим проблемам также относятся:

- недостаточная точность измерений геопотенциала;
- недостаточная высота зондирования;
- устаревшие датчики температуры и влажности с пониженной точностью измерений;
- практическое отсутствие оборудования, позволяющего определять координаты радиозондов при помощи спутниковых систем глобального позиционирования;
- преобладание на сети опасных способов добывания водорода.

Измерение атмосферного давления, температуры, влажности, скорости ветра и направления ветра в толще атмосферы имеет решающее значение для повышения точности численного прогноза погоды. Но расширение наблюдательной сети зависит не только от решения перечисленных проблем, но и от наличия дополнительного финансирования на ее создание и поддержание.

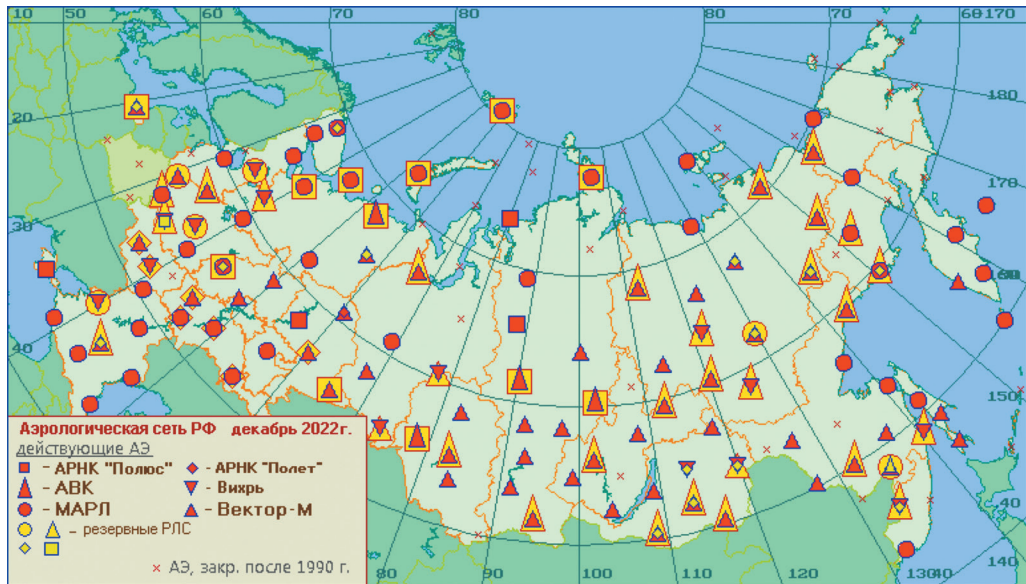


Рис. 1. Карта сети аэрологического зондирования в РФ по состоянию на декабрь 2022 года.

АРНК «Полюс — Аэрологический радионавигационный комплекс; АВК — аэрологический вычислительный комплекс; MARL — малогабаритный аэрологический радиолокатор; «ВЕКТОР-М» — Аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс; АРНК «Полет — Аэрологический радионавигационный комплекс; «Вихрь» — Аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс; РЛС — Радиолокационная станция; АЭ — Аэрологическая станция.

Fig. 1. Map of the aerological sounding network in the Russian Federation as of December 2022.

ARNK "Polyus — Aerological radio navigation complex; AVK — aerological computing complex; MARL — small-sized upper-air radar; "VECTOR-M" — Upper-air radar computing complex; ARNA "Polet — Aerological radio navigation complex; "Whirlwind" — Upper-air radar computing complex; Radar — Radar station; AE — Aerological station.

Дешевой и массовой альтернативой радиозондам, поднимаемым на шарах-пилотах, могут стать беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с размещенными на них датчиками температуры и влажности, описание которых дается в настоящей статье.

### **Зондирование атмосферы при помощи БПЛА**

Использование малых БПЛА в качестве платформы для метеорологических датчиков относится к началу 1960-х гг., но их внедрение в оперативную практику стало возможным только с появлением на рынке дешевых и эффективных БПЛА [2]. БПЛА являются не просто гибким инструментом атмосферного зондирования, но их использование, как правило, дешевле по сравнению с традиционными методами зондирования.

Существенным аргументом перехода на измерения, проводимые с помощью БПЛА, является их экономическая эффективность. При стоимости радиозонда в Европе в 160 евро, стоимость 720 запусков зондов в год составляет 115 200 евро. Так как стоимость БПЛА составляет примерно 1600 евро и в течение года используется максимум 2 БПЛА, а один радиозонд может использоваться как минимум в течение 25 запусков, то стоимость 720 запусков зондов в год составляет 23 800 евро. С учетом таких дополнительных расходов, как заработная плата сотрудников и содержание имущества, потенциальное снижение стоимости радиозондирования может составлять 60 % и более [5].

Измерения, полученные с БПЛА, не смогут полностью заменить сеть радиозондирования, так как высота подъема БПЛА обычно не превышает 5 км. Исходя из того, что временная изменчивость верхних слоев атмосферы низка по сравнению с изменчивостью в планетарном пограничном слое, то потребность в радиозондовых измерениях в верхней тропосфере и стратосфере не превышает 1 раза в сутки. Так, радиозондовые измерения, проводимые один раз в сутки, можно дополнить учащенными измерениями при помощи БПЛА и уменьшить эксплуатационные затраты. Сеть зондирования нижней и средней тропосферы в удаленных районах проще и дешевле организовать при помощи БПЛА, чем устанавливая традиционные станции радиозондирования.

Применение в качестве носителя радиозонда БПЛА позволяет снизить загрязнение окружающей среды использованными приборами и латексными оболочками, поскольку в этом случае датчики используются многократно, а латексные оболочки не используются совсем. Существенное загрязнение окружающей среды возникает при выработке водорода на станциях, тогда как при использовании БПЛА водород не применяется.

Учащенные измерения структуры пограничного слоя атмосферы, которые возможно реализовать в случае использования БПЛА, позволяют улучшить качество краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов погоды [3]. Численные эксперименты продемонстрировали снижение среднеквадратической ошибки пятнадцатиминутных прогнозов температуры, ветра и влажности более чем на 40 % при увеличении плотности сети радиозондирования, поэтому в Швейцарии

для улучшения прогноза погоды в аэропортах было начато регулярное зондирование атмосферы при помощи БПЛА [4]. В Индии в 2022 г. секретарь Министерства наук о Земле предложил промышленности и академическим кругам принять участие в изучении возможностей беспилотных технологий для наблюдения за погодой с целью улучшения качества прогнозов.

В марте 2024 г. стартовала демонстрационная кампания под эгидой ВМО, которая включает в себя шестимесячный испытательный период метеорологических наблюдений, добровольно проводимых операторами-участниками при помощи БПЛА (<https://community.wmo.int/uas-demonstration/description>). В кампании принимают участие представители государственного и частного секторов, специализирующиеся в области внедрения и эксплуатации БПЛА для целей гидрометеорологических исследований и оперативного прогнозирования. Кампания координируется Комиссией ВМО по наблюдению, инфраструктуре и информационным системам (ИНФКОМ).

По окончании демонстрационной кампании Комиссия вынесет рекомендации, касающиеся нормативных условий, налагаемых на оборудование, размещаемое на БПЛА для гидрометеорологических наблюдений. Основное внимание будет уделяться обеспечению измерения атмосферных переменных, необходимых для усвоения в системах численного прогнозирования погоды.

### **Оборудование и программное обеспечение, предназначенное для обеспечения зондирования атмосферы при помощи БПЛА**

Принимая во внимание мировой опыт, нами была поставлена цель разработки концепции отечественного комплекса вертикального зондирования атмосферы, который был бы оборудован:

- стандартным сертифицированным комплексом измерительных датчиков;
- доступным и дешевым наземным оборудованием приема сигнала с измерительных датчиков;
- свободно распространяемым программным обеспечением для декодирования получаемой информации;
- БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой, позволяющим нести нагрузку не менее 1 кг и поднимающегося на высоту не ниже 2 км.

В качестве образца для проведения эксперимента комплекса был использован БПЛА «БВС IRBIS-432» производства компании «Ирбис» (рис. 2), обладающий следующими характеристиками:

- полётное время с нагрузкой 5 кг — 60 мин;
- максимальная высота полёта — 2500 м;
- крейсерская скорость — 40 км/ч;
- температурный режим эксплуатации — от  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- ветровая нагрузка при взлете/посадке — до 20 м/с;
- взлет / посадка — вертикальный.

Важным требованием к измерительной системе комплекса является сертификация ее как средства наблюдений. Наиболее подходящим измерительным

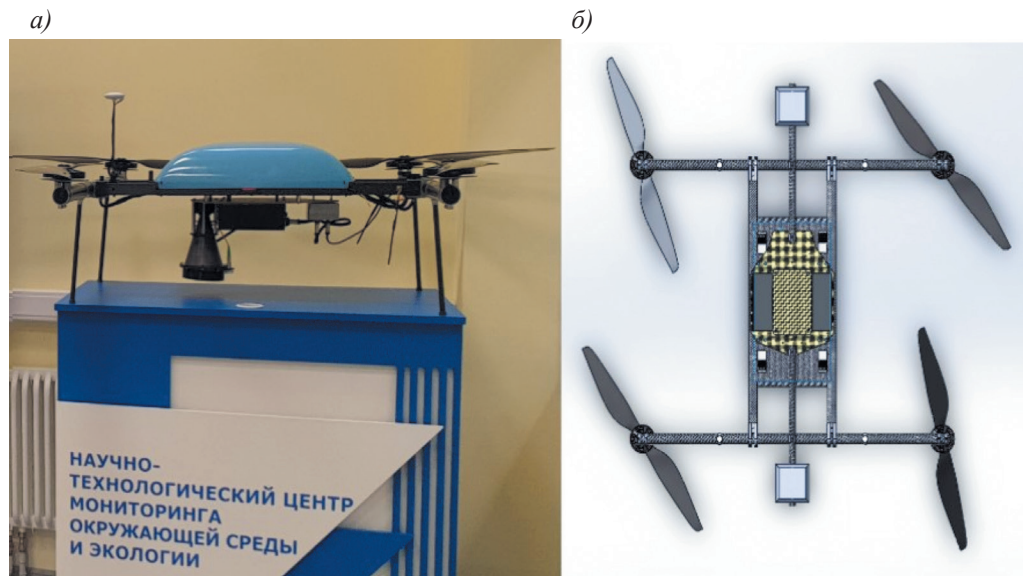


Рис. 2. БПЛА «БВС IRBIS-432»: *a* — вид в профиль; *б* — вид сверху.

Fig. 2. UAV “BVS IRBIS-432”: *a* — profile view; *б* — top view.

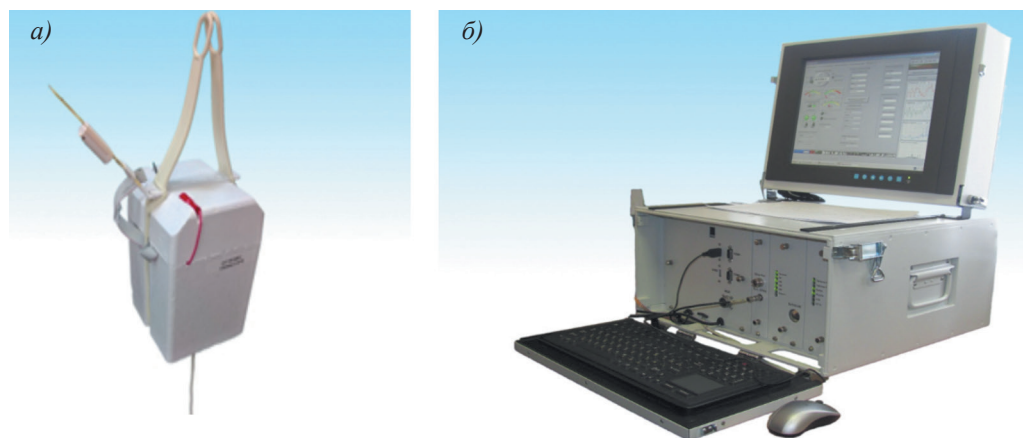


Рис. 3. Внешний вид радиозонда МР3-Н1 (*a*) и базовой станции системы радиозондирования «Полюс» (БС СР «ПОЛЮС») (*б*).

Fig. 3. Appearance of the MP3-N1 radiosonde and the base station of the Polyus radiosonde system (BS SR “POLYUS”).

оборудованием с учетом перечисленных требований является метеорологический радиозонд МР3-Н1 (рис. 3), который используется в комплекте с навигационной системой зондирования атмосферы «Полюс» (табл. 1) [6]. В документе «Программа

и качество наблюдений» за 2022 г., выпущенном Центральной Аэрологической Обсерваторией отмечается, что показатели навигационного радиозонда МРЗ-Н1 имеют наилучшую точность измерений среди оборудования, традиционно применяемого на сети Росгидромета. Измерение высоты у зонда МРЗ-Н1 производится при помощи приемника глобальной системы позиционирования GPS/ГЛОНАС, что позволяет отказаться от использования наземного радиолокатора.

Радиозонд МРЗ-Н1 редко используется на сети Росгидромета (рис. 1) вследствие его высокой стоимости и необходимости применения приемной базовой станции системы радиозондирования «Полус», но поскольку БПЛА всегда возвращается обратно в точку взлета, то после замены источника питания у радиозонда МРЗ-Н1 его можно использовать повторно, и стоимость использования снижается многократно.

Таблица 1

Основные характеристики радиозонда МРЗ-Н1  
Main characteristics of the MR3-N1 radiosonde

Датчик температуры	Миниатюрный термистор с малым показателем тепловой инерции
Диапазон измерения температуры	от -90 до +50 °С
Максимальный предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении температуры	не более 0,6 °С
Диапазон измерения относительной влажности:	от 0 до 100 %
– в диапазоне влажности 0 — 10 %	не более 8 %
– в диапазоне влажности 10 — 90 %	не более 5 %
– в диапазоне влажности 90 — 100 %	не более 8 %
Диапазон измерения атмосферного давления	от 2 гПа до 1100 гПа
Максимальная среднеквадратическая погрешность измерения высоты	не более 10 м
Рабочая частота	от 400,2 до 406 МГц

В отличие от шаров-зондов БПЛА не удаляются от точки взлета на десятки и сотни километров, следовательно, при приеме сигнала с радиозонда МРЗ-Н1 можно отказаться от применения приемной базовой станции «Полус» и осуществлять прием при помощи бюджетного компактного радиосканера RTL-SDR (рис. 4). Характеристики радиосканера позволяют осуществлять прием аналоговых и цифровых радиостанций в диапазоне приема от 10 до 1400 МГц с поддержанием низкого фоновго шума и высокой чувствительности, а наличие в радиосканере маломощного усилителя для высокочастотных (HF) сигналов позволяет простой штыревой антенной принимать сигналы радиозонда с высоты до 5 км над точкой запуска БПЛА. При этом радиосканер имеет миниатюрный размер и низкую стоимость — примерно 50 долларов США.

Использование БПЛА, укомплектованного радиозондом МРЗ-Н1 и радиосканером, удешевляет стоимость базового оборудования для проведения вертикального зондирования атмосферы в десятки раз при аналогичном качестве получаемых данных.



Рис. 4. Радиосканер RTL-SDR.

Fig. 4. RTL-SDR radio scanner.

Для приема и декодирования сигнала радиозонда МРЗ-Н1 используется стандартное программное обеспечение приемной базовой станции «Полюс». Кроме того, обработку сигнала радиозонда можно проводить при помощи свободно распространяемого программного пакета «Sdrsharp» под ОС Windows или ОС Linux. Пример экранного интерфейса «Sdrsharp» приведен на рис. 5. Для декодирования сигнала радиозонда в этом случае используется свободно распространяемое программное обеспечение, полученное из проекта `radiosonde_auto_rx`.

Дешифрирование полученных с радиозонда данных и построение аэрологической диаграммы производится при помощи свободно распространяемого набора утилит проекта `radiosonde_auto_rx`, написанного на языке Python ([https://github.com/projecthorus/radiosonde\\_auto\\_rx/wiki](https://github.com/projecthorus/radiosonde_auto_rx/wiki)). Утилиты позволяют по полученным данным зондирования построить аэрологическую диаграмму (рис. 6).

Использование радиосканера в комплекте со свободно распространяемым программным обеспечением позволяет отказаться от использования дорогостоящей базовой станции системы радиозондирования «Полюс» и применять для приема, декодирования и дешифровки данных обычный ноутбук или смартфон.

Стандартный способ измерения параметров ветра на высотах предполагает получение тем или иным способом координат радиозонда, по которым вычисляются его скорость и направление переноса. В связи с тем, что радиозонд, размещенный на БПЛА, не перемещается по направлению воздушного потока, а поднимается вертикально вверх над точкой запуска, то стандартный метод измерения параметров ветра использовать невозможно.

Измерение скорости и направления ветра комплексом БПЛА и радиозонда МРЗ-Н1 может быть выполнено несколькими способами. Одним из них является проведение измерений с использованием программного обеспечения БПЛА.





Рис. 5. Интерфейс ПО «Sdrsharp», предназначенного для обработки сигнала радиозонда, получаемого при помощи радиосканера RTL-SDR.

Fig. 5. Interface of the Sdrsharp software, designed for processing the radiosonde signal received using the RTL-SDR radio scanner.

Принцип определения скорости и направления ветра базируется на том предположении, что БПЛА полностью неподвижен и имеет автопилот, способный удерживать БПЛА в одном и том же положении независимо от направления и скорости воздействующего на него ветра. Предполагается, что угол наклона БПЛА полностью коррелирует со скоростью ветра, а погрешности в определении скорости и направлении ветра меньше 0,5 м/с и 30° соответственно (рис. 7). Величина угла наклона БПЛА, получаемая по радиоканалу управления, используется для расчета скорости и направления ветра.

Другим способом измерения параметров ветра является размещение на БПЛА ультразвукового анемометра. Хотя такой способ и позволяет получать результаты измерения с погрешностью в десятые доли градуса, но требует, как использования дорогостоящего оборудования, так и проведения дополнительных исследований по изучению влияния возмущения воздушного потока винтами конкретной модели БПЛА на измерения анемометра [7].

Еще одним способом измерения параметров ветра является возможность БПЛА дрейфовать по направлению ветра, при этом поддерживая скорость, крен, тангаж и рыскание БПЛА на нулевом уровне. Скорость и направление ветра при этом измеряется при помощи датчика глобального позиционирования радиозонда с погрешностью не более 1 м/с по скорости и 2—3° по направлению [8]. Данный

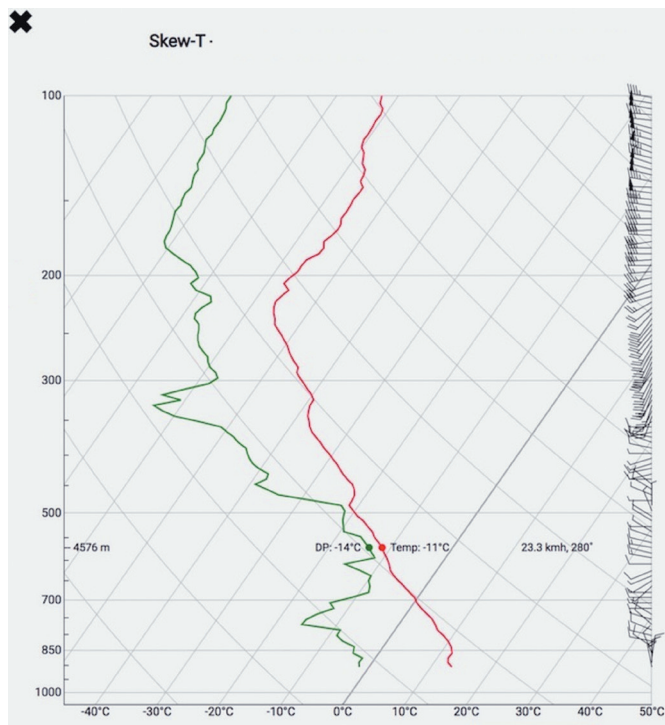


Рис. 6. Пример построения аэрологической диаграммы, построенный при помощи утилиты проекта radiosonde\_auto\_rx.

Fig. 6. An example of constructing an aerological diagram, built using the radiosonde\_auto\_rx project utility.

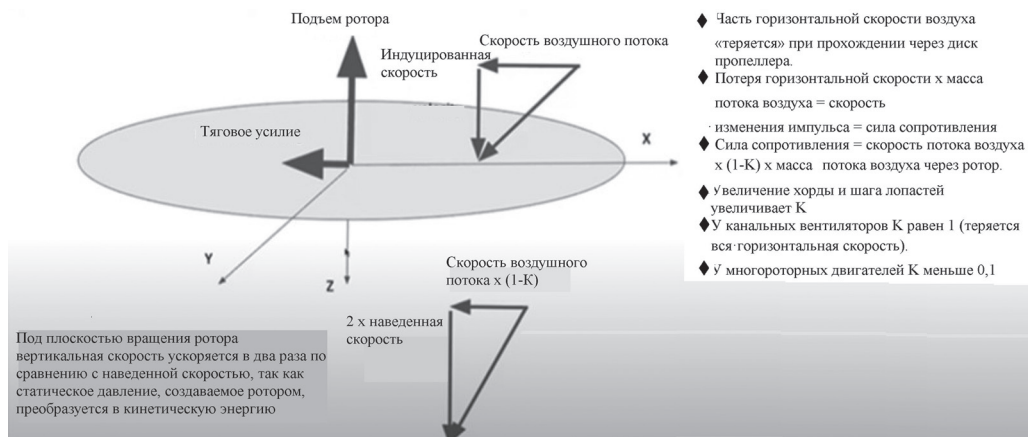


Рис. 7. Принцип определения скорости и направления ветра, действующего на БПЛА.

Fig. 7. The principle of determining the speed and direction of the wind acting on the UAV.

метод измерения параметров ветра редко используется в связи с тем, что необходимо строить сложный вертикальный маршрут полета, при котором происходит зависание БПЛА на заранее определенных горизонтах и переход в режим дрейфа с последующим возвращением в начальную точку для продолжения вертикального режима полета.

### Сравнение стандартных радиозондовых измерений и измерений с помощью БПЛА

Данные измерения температуры, влажности и параметров ветра, получаемые с БПЛА, согласуются с измерениями, проводимыми с помощью радиозондов. В работе [9] была показана согласованность вертикальных профилей средней температуры воздуха, скорости и направления ветра, получаемых с помощью БПЛА, с данными автоматической метеостанции и микроволнового температурного профилера МТП-5 (рис. 8). В исследовании [10] сравнивалось измерение

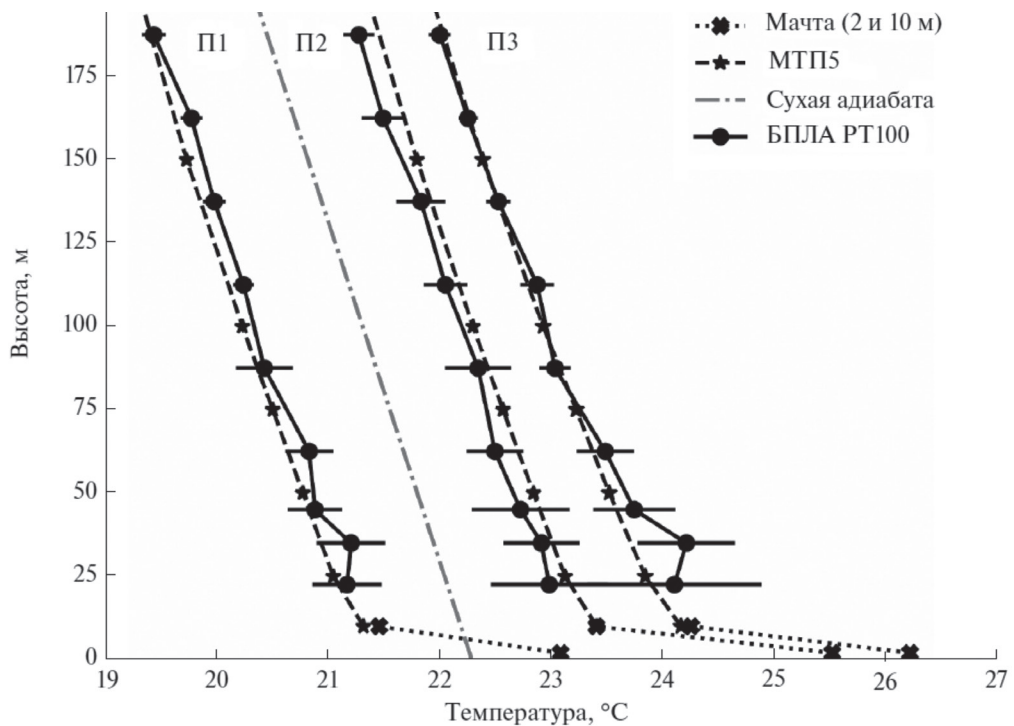


Рис. 8. Вертикальные профили температуры воздуха согласно измерениям с борта БПЛА и данным профилера МТП-5.

Горизонтальные черточки — дисперсия температуры по измерениям БПЛА.

Fig. 8. Vertical profiles of air temperature according to measurements from the UAV and data from the MTP-5 profiler.

Horizontal bars — temperature dispersion according to UAV measurements.

скорости и направления ветра по данным ориентации БПЛА и данным содаров. Среднеквадратическая ошибка измерений скорости ветра составила около 0,5 м/с по скорости и 30° по направлению ветра. При этом в статье было подчеркнуто, что улучшить качество измерений ветра можно как за счет усовершенствования аппаратных и программных вариантов обработки данных, так и размещения дополнительной аппаратуры и усложнения процедур постобработки.

В экспериментах Barfuss et al. [11] сравнивались измерения, проводимые с БПЛА, со штатной системой радиозондирования. Измерения температуры, влажности и ветра с БПЛА в целом согласуются с временными и пространственными измерениями штатной системы радиозондирования до высоты 500 гПа, то есть до высот, для которых предлагается использовать комплекс радиозондирования. Инверсии температуры, изменения градиента температуры и параметры ветра в равной степени фиксируются датчиками, размещенными на БПЛА и штатными радиозондовыми измерениями.

### **Выводы по возможности использования БПЛА как средства измерения параметров вертикальной структуры атмосферы**

В настоящее время наиболее широко используемым измерительным прибором для метеорологического профилирования атмосферы является радиозонд, поднимаемый оболочкой, наполненной водородом или гелием. Однако в последние годы появился новый способ зондирования нижних слоев атмосферы при помощи измерительных датчиков, размещенных на БПЛА. Этот способ является перспективной и недорогой альтернативой традиционным платформам вертикального зондирования атмосферы.

В данной работе автором предложена оптимальная комплектация системы радиозондирования атмосферы при помощи БПЛА, которая предполагает многократное использование стандартного радиозонда МРЗ-Н1. Для замены дорогостоящей наземной станции приема и обработки сигнала предложен радиосканер RTL-SDR, подключаемый к ноутбуку или смартфону, а в качестве инструмента дешифрирования и построения аэрологической диаграммы предлагается использовать свободно распространяемое программное обеспечение.

В связи с тем, что БПЛА производит вертикальное зондирование над точкой взлета и посадки, то вычисление параметров ветра становится невозможным методом определения координат аппарата. Для расчета параметров ветра предлагается использовать программное обеспечение, которое позволяет восстанавливать скорость и направление ветра, определяя угол наклона БПЛА к набегающему воздушному потоку. Альтернативным способом расчета ветровых параметров является использование данных датчика GPS/ГЛОНАСС. Для этого БПЛА на фиксированных высотах переводится в режим дрейфа по ветру. Второй способ расчета параметров ветра является более точным, но его применение значительно усложняет траекторию полета БПЛА и увеличивает время проведения зондирования.

Очевидными преимуществами предложенной схемы зондирования при помощи БПЛА являются:

— использование серийного сертифицированного оборудования, позволяющего получать результаты измерений с той же точностью, что и на регулярной сети измерений;

— низкая стоимость эксплуатации комплекса, которая примерно в восемь раз меньше эксплуатационной стоимости традиционной станции аэрологического зондирования;

— высокая мобильность вследствие компактности используемого оборудования позволяет проводить измерения в труднодоступных районах;

— возможность проведения учащенных наблюдений пограничного слоя атмосферы позволяет увеличить качество краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов.

Для внедрения БПЛА в оперативную практику Росгидромета необходимо проведение дополнительных исследований по выбору схемы расчета ветровых параметров, проведение сертификации всего измерительного комплекса как средства измерения и модификация структуры наблюдательной сети вертикального зондирования атмосферы.

### *Список литературы*

1. Guide to meteorological instrument and observing practices // WMO. 1984. Vol. 6. P. 600. DOI: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-432>.
2. Konrad T., Hill M., Rowland J. et al. A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorological Sensors // Johns Hopkins APL Tech. Dig. 1970. Vol. 10. P. 11—21.
3. de Boer, Diehl G., Jacob C. et al. Development of Community, Capabilities, and Understanding through Unmanned Aircraft-Based // Atmospheric Research, Bulletin of the American Meteorological Society. 2020. Vol. 101. P. 684—699. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0050.1.
4. Leuenberger D., Haefele A., Omanovic N. et al. Improving High-Impact Numerical Weather Prediction with Lidar and Drone Observations // Bulletin of the American Meteorological Society. 2020. Vol. 101, P. 1036—1051. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0119.1>.
5. Pätzold F. Windmessung mittels Segelflugzeug, Forschungsbericht. // Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt, Braunschweig, Germany. 2018. Vol. 2018. 04. P.44. DOI: 10.24355/dbbs.084-201805221102-1.
6. Catalog – 2023: [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.meteo-radiy.ru/katalog/radiozondyi/radiozond\\_mp3\\_h1](http://www.meteo-radiy.ru/katalog/radiozondyi/radiozond_mp3_h1) (дата обращения: 01.11.2023)
7. Shimura T., Inoue M., Tsujimoto H. et al. Estimation of wind vector profile using a hexarotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above surface. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2018. Vol. 35. Issue 8. P. 1621—1631. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0186.1/>
8. Kugelberg E., Andersson O., Wind Vector Estimation by Drone // School of Industrial Engineering and Management, ITM, Sweden. 2020. P. 94. DiVA, id: diva2:1464433.
9. Чечина Д. Г., Артамонова А. Ю., Бодунков Н. Е. и др. Опыт исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя с помощью беспилотного летательного аппарата // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. № 57. С. 602—610. DOI: 10.31857/S0002351521050047.
10. Ross T., Palomaki V., Nathan T. et al. Wind Estimation in the Lower Atmosphere Using Multirotor Aircraft // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2017. Vol. 34. Issue 5. P. 1183—1191. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0177.1.
11. Barfuss K., Schmithusen H., Lampert A. Drone-based meteorological observations up to the tropopause // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 3739—3765. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-16-3739-2023>.

### **References**

1. Guide to meteorological instrument and observing practices. WMO. 1984; 6: 600.
2. Konrad T., Hill M., Rowland J., et al. A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorological Sensors. Johns Hopkins APL Tech. Dig. 1970; 10: 11—21.
3. de Boer, Diehl G., Jacob C., Houston J. et al. Development of Community, Capabilities, and Understanding through Unmanned Aircraft-Based. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2020; 101: 684—699.
4. Leuenberger D., Haeefele A., Omanovic N. et al. Improving High-Impact Numerical Weather Prediction with Lidar and Drone Observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2020; 101: 1036—1051.
5. Pätzold F. Windmessung mittels Segelflugzeug, Forschungsbericht. Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt, Braunschweig, Germany. 2018; 04.
6. Catalog — 2023. Available at: [http://www.meteo-radiy.ru/katalog/radiozondyi/radiozond\\_mp3\\_h1](http://www.meteo-radiy.ru/katalog/radiozondyi/radiozond_mp3_h1) (accessed on: 01.11.2023)
7. Shimura T., Inoue M., Tsujimoto H. et al. Estimation of wind vector profile using a hexarotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2018; 35(8): 1621—1631.
8. Kugelberg E., Andersson O., Wind Vector Estimation by Drone. School of Industrial Engineering and Management, ITM, Sweden. 2020
9. Chechina D. G., Artamonova A. Yu., Bodunkov N. E. et al. Experience in studying the turbulent structure of the atmospheric boundary layer using an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestia RAN. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021; 57: (602—610). (In Russ).
10. Ross T., Palomaki V., Nathan T. et al. Wind Estimation in the Lower Atmosphere Using Multirotor Aircraft. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2017; 34: 1183—1191.
11. Barfuss K., Schmithusen H., Lampert A. Drone-based meteorological observations up to the tropopause. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2023; 16: 3739—3765.

### **Сведения об авторе**

*Цепелев Валерий Юрьевич*, кандидат географических наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет, доцент кафедры метеорологических прогнозов, v0010200@mail.ru.

### **Information about author**

*Tsepelev Valery Yurievich*, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Meteorological Forecasts of the Russian State University of Humanities, v0010200@mail.ru.

*Статья поступила 19.11.2023*

*Принята в печать после доработки 14.05.2024*

*The article was received on 19.11.2023*

*The article was accepted after revision on 14.05.2024*