

**ПРИБОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ,
ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ**

УДК 551.508.8 + 551.501.8

**АВТОНОМНЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

©2026 г. А. А. Кобзев, А. Е. Тельминов

Поступила в редакцию 17.04.2026

После доработки 28.07.2026

Принята к публикации 13.08.2026

Атмосферный пограничный слой (АПС) является нижней частью тропосферы, где происходит непосредственный энергомассообмен земной поверхности с атмосферой. Глубокое понимание процессов в атмосферном пограничном слое имеет первостепенное значение для ряда научных и прикладных задач. Ключевыми областями, где это необходимо, являются численное прогнозирование погоды, где параметризация пограничного слоя напрямую влияет на точность моделей, а также авиационная метеорология, требующая точных данных о сдвиге ветра и турбулентности в нижних слоях атмосферы для обеспечения безопасности полетов. Перспективным инструментом для исследования пространственных профилей метеорологических характеристик является использование беспилотных воздушных судов (БВС) с установленными метеорологическими датчиками [1–4].

В настоящее время широко доступны БВС, обеспечивающие приемлемые летные характеристики при относительно низкой стоимости. Компании предлагают линейки БВС коптерного типа со взлетной массой до 1 кг и с продолжительностью времени полета, достаточной, чтобы, например, поднять метеонагрузку на высоту 500 м со скоростью 1 м/с и опустить ее с той же скоростью в достаточно ветреную погоду (5–7 м/с).

Нами был создан автономный малогабаритный метеорологический датчик для измерения температуры и относительной влажности воздуха, а также атмосферного давления, который может использоваться с типовыми платформами БВС микрокласса.

Особенности конструкции метеонагрузки для установки на БВС продиктованы требованиями к малой массе и низкой парусности. При этом чувствительные сенсоры метеостанции должны быть защищены от воздействия прямой солнечной радиации, а также от теплового воздействия батареи и корпуса БВС, которые могут существенно нагреваться во

время полета. На рис. 1 приведены внешний вид и состав разработанной метеостанции и снимок данного изделия, установленного на квадрокоптер DJI Air2s.

Конструкция метеодатчика представляет собой корпус-основание, содержащий АЦП (ADS1115), контроллер сбора (Raspberry Pi Zero W) и систему автономного питания. Корпус служит опорой для мини-мачты, изготовленной из углепластиковой трубки с внешним диаметром 8 мм. На мачте установлена защита от солнечной радиации с размещенными в ней датчиками. Защита от солнечной радиации выполнена из жесткой поливинилхлоридной трубки белого цвета диаметром 40 мм, размещенной вертикально. Размеры и материалы изделия подобраны так, чтобы исключить как резонансные низкочастотные колебания, возникающие при обтекании метеостанции ветровым потоком, так и собственные механические колебания БВС.

Программное обеспечение (ПО) для метеорологических беспилотников MeteoDrone представляет собой интерфейсное приложение, функционирующее на ОС Windows 7-й версии и выше. ПО позволяет просматривать текущее состояние системы синхронизации GPS/GLONASS-времени, текущее значение времени и при отсутствии сигналов со спутников осуществлять синхронизацию по времени с часами персонального компьютера (ПК). В ПО также реализованы такие функции, как сохранение данных измерений на ПК, очистка данных, перезапуск контроллера метеостанции и выключение устройства. Связь с ПК происходит через WiFi-модуль контроллера метеостанции по протоколу TCP/IP, здесь же функционирует http-сервер, позволяющий просматривать и скачивать данные измерений с помощью подключения через стандартный интернет-браузер.

С целью обеспечения достоверности измерений разработанного датчика при различных климатических воздействиях была выполнена первичная градуировка основных сенсоров в их рабочих диапазонах. Для градуировки сенсоров температуры и влажности использовались климатическая камера КТК-800 и эталонный термометр МИТ-8 (эталон 3-го разряда), для контроля влажности использовался термогигрометр ИВА-6 (эталон 2-го разряда). Сенсор атмосферного давления градуировался с помощью измерителя БОП-1 (эталон 1-го разряда) в барокамере. Все эталонные средства измерений имеют действующие свидетельства о поверке. Результаты градуировки использованы для введения поправочных коэффициентов в алгоритм обработки данных.

Основные технические характеристики разработанного метеодатчика представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики метеодатчика

Характеристика	Значение	Примечание
Диапазон измерений температуры воздуха, °С	–40 ÷ +50	Термистор NTC 10 кОм, сенсор BME280
Предел допустимой погрешности измерения температуры воздуха, °С	±1.0	
Диапазон измерений влажности воздуха	0–100%	Сенсор BME280
Предел допустимой погрешности измерения влажности воздуха	±3%	
Диапазон измерений атмосферного давления, гПа	693–1100	
Предел допустимой погрешности измерения атмосферного давления, гПа	±1.0	
Габаритные размеры (В×Ш×Д), мм ³ , не более	250×80×50	
Масса, г, не более	145	
GPS/GLONASS	Есть	
Режим автономных измерений, ч, не менее	3.5	

Оценка результатов разработки проводилась на основе анализа серии полетов БВС коптерного типа с метеодатчиком на борту. Полевые испытания осуществлялись в Томске в зимнее время на территории с характерным пригородным рельефом и высотой застройки до 30 м. Температура приземного слоя воздуха в точке запуска составляла в среднем минус 18–20 °С.

Первые полеты осуществлялись в режиме парения вблизи стационарно установленного ультразвукового метеоконцентра АМК-04 [5] с целью определения влияния вихревых потоков от винтов и теплового излучения корпуса БВС на показания установленного на нем метеодатчика. Синхронное измерение температуры воздуха с помощью АМК-04 и метеодатчика, установленного на БВС, проводилось в течение 5 мин с усреднением по каждой минуте. Средняя скорость горизонтального ветра составляла 2–3 м/с. Средняя ошибка за 5 мин не превышала 0.19 °С, максимальная составляет 0.37 °С, что вписывается в диапазон допустимой погрешности измерений.

На втором этапе проводилось измерение вертикальных профилей метеорологических величин. Подъем БВС выполнялся до высот 150 м с постоянной вертикальной скоростью 1 м/с, как при наборе высоты, такая же вертикальная скорость была при снижении. В ходе полетов была зафиксирована приземная температурная инверсия в нижнем слое (высотой до 20 м). На участке от 20 до 110 м стратификация атмосферы преимущественно была близка к нейтральной, а на высотах от 110 м и выше отмечена сверхустойчивая стратификация. Такое состояние приземной атмосферы типично для городских условий северных широт в зимнее время года. Отметим, что анализ данных, полученных при подъеме и спуске, выявил наличие временного лага в измерениях температуры, характерного для любых инерционных датчиков, работающих на подвижных платформах. В соответствии с результатами, представленными в

работах [3, 4], величина этого лага для сходных типов датчиков составляет от 2.5 до 5 с. В условиях наших экспериментов с учетом инерционности примененного сенсора и вертикальной скорости БВС 1 м/с лаг достигал 4–7 с, что приводило к смещению восстановленного профиля относительно реального на 4–7 м по высоте.

Измерения относительной влажности воздуха характеризовались существенно большей инерционностью по сравнению с температурными измерениями. Это связано не только с термическими процессами, но и с ограниченной скоростью абсорбции водяного пара из атмосферы в чувствительный материал сенсора. Атмосферное давление изменялось с высотой практически линейно в соответствии с барометрическим законом, при этом значимых пульсаций даже при порывистом ветре зафиксировано не было.

На основе проведенных экспериментальных исследований автономного метеорологического датчика для БВС могут быть сформулированы следующие основные выводы.

Разработанный малогабаритный метеодатчик пригоден для измерения вертикальных профилей температуры, относительной влажности и атмосферного давления в пограничном слое атмосферы с использованием БВС коптерного типа.

Выявлено, что направление полета существенно влияет на качество измерений. При нисходящем движении разрешающая способность температурных измерений снижается из-за попадания датчика в спутный след (возмущенная область атмосферы), создаваемый БВС. Для построения достоверных вертикальных профилей рекомендуется преимущественно использовать режим подъема с учетом поправки на инерционные свойства применяемого сенсора.

Для повышения точности восстановления тонкой структуры атмосферного пограничного слоя в условиях малых вертикальных градиентов температуры и влажности рекомендуется ограничивать вертикальную скорость БВС значениями менее 1 м/с. При необходимости быстрого зондирования следует применять поправочные алгоритмы, учитывающие инерционные характеристики примененных сенсоров.

Таким образом, предложенный метеорологический датчик может рассматриваться как эффективный и доступный инструмент для зондирования пограничного слоя атмосферы. Полученные экспериментальные результаты определяют границы его применимости, количественные оценки систематических погрешностей, связанных с инерционностью и режимом полета, а также пути дальнейшего совершенствования измерительной методики.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.

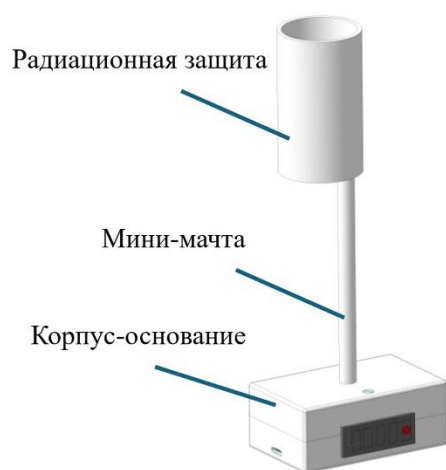
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Пашкин А.Д., Репина И.А., Алексеев В.А. Международная конференция “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”. Москва, 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13342.69440>
2. Репина И.А., Варенцов М.И., Чечин Д.Г. и др. Инноватика и экспертиза. 2020. № 2 (30). С. 20. <https://doi.org/10.35264/1996-2274-2020-2-20-39>
3. Cassano J. Antarct. Sci. 2014. V. 26. № 2. P. 205. <https://doi.org/10.1017/S0954102013000539>
4. Tikhomirov A.B., Lesins G., Drummond J.R. Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. P. 7123. <https://doi.org/10.5194/amt-14-7123-2021>
5. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17712784>

Адрес для справок: Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 10/3, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: alexey-kobzev@mail.ru

ПОДПИСЬ К РИСУНКУ

Рис. 1. Внешний вид разработанного метеодатчика (**а**), изделие в процессе эксплуатации на квадрокоптере (**б**)



(а)



(б)

Рис. 1.