

УДК 551.575:551.508.7:629.73-519

doi: 10.33933/2713-3001-2026-83-358-365

**Измерительный комплекс
для мониторинга параметров переохлажденных туманов
с использованием беспилотных авиационных систем**

***Степан Владимирович Антонов, Сергей Михайлович Двоеглазов,
Евгений Николаевич Николаев, Андрей Михайлович Петрунин,
Николай Александрович Платонов, Андрей Викторович Частухин,
Георгий Георгиевич Щукин***

АНО «Агентство атмосферных технологий», Москва, Россия, attech@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается применение измерительного комплекса для мониторинга параметров переохлажденных туманов с использованием беспилотных авиационных систем (БАС). Представлена структура измерительного комплекса, размещаемого на борту беспилотной авиационной системы. Рассмотрены характеристики используемых датчиков и результаты испытаний измерительного оборудования. Показано, что применение беспилотных авиационных систем позволяет оперативно получать данные о температуре, влажности, давлении, параметрах ветра в районе проведения работ.

Ключевые слова. Беспилотные авиационные системы, переохлажденные туманы, зондирование атмосферы.

**Measuring complex for monitoring the parameters
of supercooled fogs using unmanned aerial systems**

***Stepan V. Antonov, Sergei M. Dvoeglazov,
Evgeniy N. Nikolaev, Andrey M. Petrunin, Nikolai A. Platonov,
Andrey V. Chastukhin, Georgy G. Shchukin***

ANO “Agency of Atmospheric Technologies”, Moscow, Russia, attech@mail.ru

Summary. The paper considers the application of a measuring complex for monitoring the parameters of supercooled fogs using unmanned aerial systems (UAS). The structure of the measuring complex placed on board an unmanned aerial system is presented. The characteristics of the used sensors and the results of testing the measuring equipment are considered. It is shown that the use of unmanned aerial systems allows for the prompt acquisition of data on temperature, humidity, pressure, and wind parameters in the area of work.

Keywords. Unmanned aerial systems, supercooled fogs, atmospheric sensing.

Введение

Эффективность мероприятий по рассеянию переохлажденных туманов во многом определяется наличием оперативной информации о состоянии атмосферной среды. К числу основных параметров, обеспечивающих обоснованность и точность принятия решений при проведении работ по воздействию на туман, относятся температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра.

Традиционным методом получения вертикальных профилей метеорологических параметров является радиозондирование атмосферы. Однако ограниченное количество станций радиозондирования и невысокая периодичность запусков радиозондов затрудняют использование данного метода для оперативного мониторинга атмосферных условий.

Для оперативного получения вертикальных профилей температуры, направления и скорости ветра могут быть использованы современные отечественные средства дистанционного зондирования такие как Волна-3, Волна-4, ЛАТАН-3, ПЛВ-300, ПЛВ-5000, ПЛВ-10000, МТП-5 и другие [1]. Однако стоимость таких комплексов достаточно высока, что практически исключает их применение в оперативных работах. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение беспилотных авиационных систем, оснащенных компактными измерительными комплексами, позволяющими получать оперативные данные непосредственно в зоне проведения работ, в том числе в условиях повышенной влажности, тумана и облачности.

Перспектива применения беспилотных авиационных систем в туманах и облаках позволит получать достоверную информацию о текущем состоянии атмосферы в пограничном слое в локальных точках, представляющих интерес с точки зрения необходимой оперативной информации для принятия решения о начале работ по активному воздействию на туманы. Беспилотная авиация имеет огромный потенциал. Для реализации этого потенциала необходимо максимально использовать технические возможности беспилотных комплексов. Ниже рассматривается измерительный комплекс для мониторинга параметров тумана.

Измерительный комплекс параметров тумана

Измерительный комплекс состоит из бортового блока сбора и передачи параметров и наземного блока приема и обработки данных. Бортовой блок включает датчики температуры, влажности и давления, датчик количества взвешенных частиц в воздухе (PM — Particulate Matter) на единицу объема, датчик рассеянного отражения, GPS модуль, контроллер обработки данных и радиомодуль передачи информации.

Датчик количества взвешенных частиц применяется для оценки содержания аэрозольных частиц и микрокапель воды в исследуемой воздушной среде. Измерение концентрации взвешенных частиц позволяет определить верхнюю границу тумана. Датчик рассеянного отражения также предназначен для определения верхней границы тумана. Принцип его работы основан на регистрации интенсивности

излучения лазерного источника, рассеянного аэрозольными частицами и микрокаплями воды. При прохождении лазерного луча через объём воздуха происходит рассеяние излучения на каплях воды. Часть рассеянного излучения фиксируется фотоприёмником датчика, который преобразует оптический сигнал в электрический, что позволяет определить верхнюю границу тумана.

GPS модуль используется для определения пространственных координат беспилотной авиационной системы в процессе выполнения измерений. Получение точных географических координат (широты, долготы и высоты полёта) позволяет привязать измеряемые параметры атмосферы к конкретной точке в исследуемом объёме воздушной среды. Использование навигационных данных также позволяет синхронизировать измерения с траекторией полёта беспилотной авиационной системы и формировать вертикальные и горизонтальные профили параметров переохлаждённого тумана. Основные характеристики датчиков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики датчиков
Main characteristics of the sensors

Характеристика	Значение/диапазон
Диапазон измерения температуры	-40...+85 °С
Диапазон измерения влажности	0—100 %
Диапазон измерения давления	300—1100 мм рт. ст.
Точность измерения температуры	±0,5 °С
Точность измерения влажности	±3 %
Точность измерения давления	±1 мм рт. ст.
Точность GPS-позиционирования	1—3 см
Диапазон размеров взвешенных частиц	0,3—10 Мкм
Погрешность измерения концентрации взвешенных частиц	±10 %

В составе измерительного комплекса используется сбрасываемый зонд для получения вертикального профиля направления и скорости ветра, созданный в Агентстве АТТЕХ. Сбрасываемый зонд представляет собой плату с модулем GPS, радиомодулем с антенной, отсеком для батарей питания, прикрепленную к свободно раскрываемой парашютной системе. Прием данных от зонда осуществляется с помощью наземной станции, включающей компьютер для последующей обработки информации [2].

Дополнительно определение верхней границы тумана осуществляется по результатам анализа информации с находящейся на БАС видеокамеры. Собранные данные передаются по радиоканалу на наземную станцию, где осуществляется их регистрация, обработка и анализ. На рис. 1—3 показаны блок—схема и вид бортового блока сбора и передачи параметров по радиоканалу и наземного блока приема и обработки данных.



Рис. 1. Блок—схема измерительного комплекса параметров тумана.

Fig. 1. Block diagram of the fog parameter measurement system.

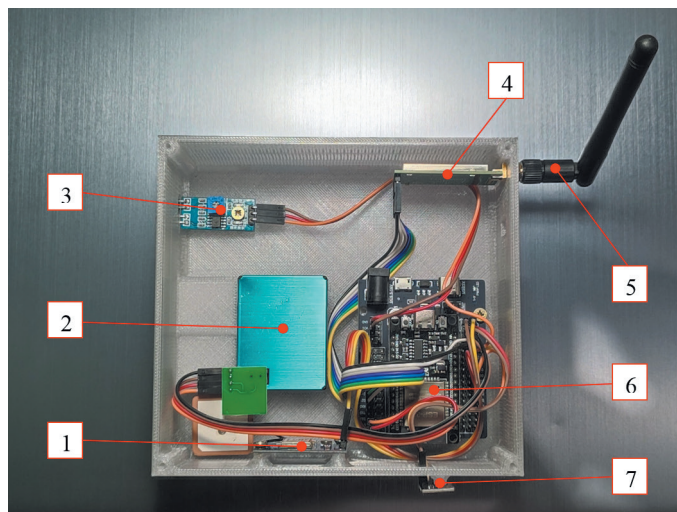


Рис. 2. Блок сбора и передачи параметров по радиоканалу:

1 — GPS модуль, 2 — датчик количества взвешенных частиц, 3 — датчик рассеянного отражения, 4 — радиомодуль, 5 — антенна, 6 — контроллер, 7 — датчик температуры, влажности, давления.

Fig. 2. Block of collection and transmission of parameters via radio channel:

1 — GPS module, 2 — sensor of the amount of suspended particles, 3 — sensor of scattered reflection, 4 — radio module, 5 — antenna, 6 — controller, 7 — sensor of temperature, humidity, pressure.

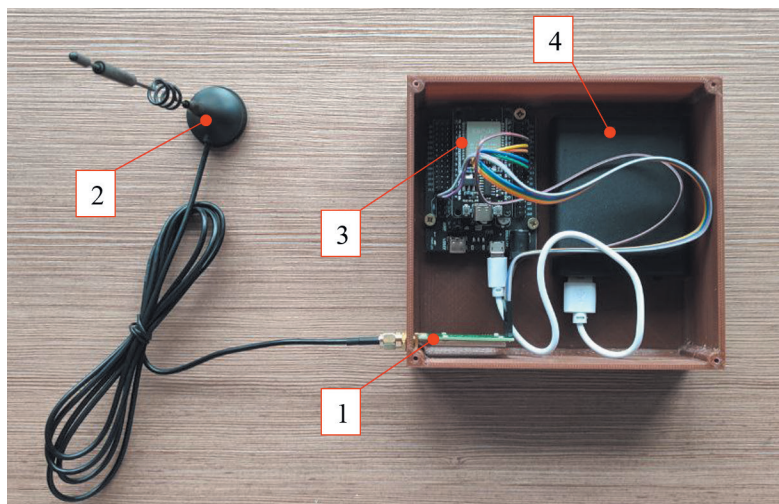


Рис. 3. Блок приема и обработки данных:

1 — радиомодуль, 2 — антенна, 3 — контроллер, 4 — источник питания.

Fig. 3. Data reception and processing unit:

1 — radio module, 2 — antenna, 3 — controller, 4 — power supply.

Испытания измерительного блока

Испытания измерительного блока проводились в лабораторных и природных условиях. В лабораторных условиях моделирование тумана осуществлялось при помощи парогенератора. Поток водяного пара подавался в область размещения измерительного блока в течение одной минуты, что позволяло формировать аэрозольную среду, близкую по характеристикам к туману. До начала генерации пара концентрация взвешенных частиц в воздухе соответствовала фоновому уровню. После включения парогенератора наблюдалось резкое увеличение концентрации частиц в диапазонах: PM1 (0,3—1 мкм), PM2.5 (1—2,5 мкм), PM10 (2,5—10 мкм) табл. 2. После прекращения подачи пара концентрация частиц постепенно снижалась и возвращалась к значениям, близким к исходному уровню. Это подтвердило корректность работы датчиков.

Таблица 2

Показания датчиков

Sensor readings

Температура	Влажность	Давление	Туман	PM1.0	PM2.5	PM10
-19,4 °С	25,9 %	756,8 мм рт. ст.	Нет	3 Мкм/м ³	6 Мкм/м ³	7 Мкм/м ³
-12,6 °С	73,2 %	756,7 мм рт. ст.	Есть	204 Мкм/м ³	2654 Мкм/м ³	4626 Мкм/м ³

Наземные натурные испытания проводились 14 и 18 февраля 2026 г., район проведения испытаний — Московская область.

Испытания 14 февраля 2026 г. Погодные условия: температура воздуха: +1...+3 °С, относительная влажность: 92—100 %, атмосферное давление: 735 мм рт. ст., наличие тумана. Визуальная дальность видимости составляла приблизительно 100—150 м.

В ходе измерений датчик рассеянного отражения зафиксировал наличие тумана, а датчик взвешенных частиц зарегистрировал увеличение концентрации аэрозольных частиц по сравнению с фоновыми значениями (табл. 3).

Таблица 3

Результаты натурных испытаний датчиков

The results of field tests of sensors

Температура	Влажность	Давление	Туман	PM1.0	PM2.5	PM10
+ 5,6 °С	66,8 %	730,2 мм рт. ст.	Есть	18 Мкм/м ³	30 Мкм/м ³	38 Мкм/м ³
- 16,1 °С	49,4 %	748,8 мм рт. ст.	Есть	99 Мкм/м ³	169 Мкм/м ³	230 Мкм/м ³

Испытания 18 февраля 2026 г. Погодные условия: температура воздуха: -19...-20 °С, относительная влажность: 72—75 %, атмосферное давление: 753 мм рт. ст., наличие тумана. Визуальная дальность видимости составляла приблизительно 50—100 м. Результаты измерений показали аналогичную картину: датчик рассеянного отражения подтвердил наличие тумана, а концентрация взвешенных частиц в воздухе значительно превышала фоновый уровень (табл. 3).

Оценка дальности передачи данных выполнялась при наземном размещении передающего блока и при размещении его на борту самолета АН-2. В наземных

испытаниях блок передачи данных размещался на высоте 15 м. Блок приема данных находился в автомобиле, который удалялся от точки установки передатчика. Устойчивый прием телеметрии наблюдался на расстоянии до 14 км.

Летные испытания проводились на аэродроме Киржач. Блок передачи данных был установлен на борт самолета АН-2, а блок приема данных по радиоканалу размещался в мобильном пункте управления. Самолет АН-2 был поднят на высоту 200—250 м. Полет проходил в зоне аэродрома в радиусе набора высоты вокруг аэродрома 5—7 км. Анализ передаваемых пакетов данных подтвердил отсутствие потерь информации. Наземные и летные испытания радиоканала передачи данных показали устойчивый прием телеметрической информации.

Для оценки точности определения высоты измерительный блок размещался на различных высотах. Полученные результаты показали, что погрешность определения высоты по данным GPS составляет порядка 3—4 м, а по барометрическому датчику давления — около 1 м.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили работоспособность разработанного измерительного комплекса. Используемые датчики обеспечивают измерение основных параметров атмосферной среды.

Применение беспилотных авиационных систем для мониторинга параметров тумана позволяет оперативно получать достоверную информацию о состоянии атмосферной среды и может быть использовано для обеспечения принятия обоснованных решений при проведении мероприятий по воздействию на переохлажденные туманы и контролю результата. Данное направление может стать основой для изучения процессов облакообразования и активного воздействия на них.

Список литературы

1. Борейшо А. С., Коняев М. А., Ким А. А. Лидарные комплексы для исследования атмосферы. Изд-во «Лань». 2024. СПб., 243 с.
2. Антонов С. В., Бычков А. А., Сергеев Б. Н., Частухин А. В., Щукин Г. Г. Теоретическое обоснование применения беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на переохлажденные туманы // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. СПб. 2018. № 662. С. 13—17.

References

1. Boreysho A. S., Konyaev M. A., Kim A. A. Lidar systems for atmospheric research. Izdatelstvo Lan = Lan Publishing House. 2024:243 p. (In Russ.).
2. Antonov S. V., Bychkov A. A., Sergeev B. N., Chastukhin A. V., Shchukin G. G. Theoretical justification for the use of unmanned aerial vehicles in works on the impact on supercooled fogs. Trudi Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo = Proceedings of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy. 2018;(662):(13—17). (In Russ.).

Информация об авторах

Антонов Степан Владимирович, ведущий инженер, АНО «Агентство АГТЕХ», klybok777@gmail.com.

Двоеглазов Сергей Михайлович, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», s.m.dvoeglazov@mail.ru.

Николаев Евгений Николаевич, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», jn81@yandex.ru.

Петрунин Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по оперативным проектам, АНО «Агентство АТТЕХ», a.m.petrinin@mail.ru.

Платонов Николай Александрович, ведущий инженер, АНО «Агентство АТТЕХ», n-a-platonov@mail.ru.

Частухин Андрей Викторович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, АНО «Агентство АТТЕХ», a.chastuhin@mail.ru.

Щукин Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, консультант, АНО «Агентство АТТЕХ», ggshchukin@mail.ru.

Information about authors

Antonov Stepan V., leading engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Dvoeglazov Sergey M., Lead Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Nikolaev Evgeny N., Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Petrinin Andrey M., PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Operational Projects, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Platonov Nikolay A., Lead Engineer, ANO «Atmospheric Technology Agency»

Chastukhin Andrey V., PhD (Phys. and Math. Sci.), Deputy Director for Research, ANO «Atmospheric Technology Agency».

Shchukin Georgy G., Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), Professor, Consultant, ANO «Atmospheric Technology Agency».