

### **Применение беспилотных летательных аппаратов для определения термодинамического состояния пограничного слоя атмосферы**

О.В. Страшко<sup>1</sup>, И.Е. Кузнецов<sup>1</sup>, А.Ю. Качалкин<sup>1</sup>, Д.В. Акмулин<sup>2</sup>, А.Г. Горелик<sup>2</sup>, Н.М. Ситников<sup>2</sup>, И.И. Чекулаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А».

<sup>2</sup>ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3, e-mail: sitnikovnm@mail.ru

*Рассмотрены вопросы, касающиеся получения информации о пространственных распределениях метеорологических параметров атмосферы с помощью малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных специализированной бортовой аппаратурой. Отмечено, что на базе БПЛА могут быть созданы средства, включающие датчики и приборы не только для измерения основных метеорологических параметров (температура, давление, влажность, скорость и направление ветра), но и для аппаратуры для получения дополнительной информации о состоянии атмосферы, такой как границы облачности, зоны турбулентности, распределение концентрации загрязняющих примесей, электрофизические параметры атмосферы и т.д.. Мобильность, простота использования и сравнительно низкая стоимость делают БПЛА перспективной основой для создания аппаратных комплексов, направленных на выполнение различных задач метеорологического и экологического обеспечения. Приведены некоторые результаты работ по разработке методов и средств атмосферных исследований на базе БПЛА, выполненных в ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» в течение ряда последних лет.*

Информация о пространственных распределениях параметров атмосферы необходима для решения различных задач, таких как обеспечение безопасности полетов авиационной и космической техники, мониторинг окружающей среды в условиях чрезвычайных ситуаций, метеорологическое обеспечение экологически опасных объектов и т.д. Она также необходима для математического моделирования атмосферных явлений, прогнозов погоды, прогнозирования распространения загрязняющих примесей, оценки последствий лесных пожаров и аварий на атомных станциях и химических предприятиях и оптимизации мер по их преодолению и т.д. Измерения параметров атмосферы вблизи земной поверхности не позволяет получить полную и достоверную информацию о метеорологическом и экологическом состоянии окружающей среды.

В настоящее время для получения информации о пространственных, прежде всего, вертикальных распределениях параметров атмосферы применяются различные средства, использующие как контактные, так и дистанционные методы измерений. Измерения вертикальных распределений температуры в пограничном слое атмосферы выполняют радиометрическими методами, в частности, радиометрическими профилемерами [1]. Для измерения вертикальных распределений скорости ветра используются акустические локаторы (содары) [2]. Измерения вертикальных распределений влажности представляют собой отдельную задачу, для решения которой необходима специальная аппаратура. Информация о пространственных распределениях газовых и аэрозольных примесей в атмосфере практически отсутствует. Вертикальные распределения параметров атмосферы также получают с помощью аппаратуры, устанавливаемой на метеорологических мачтах. Однако, метеорологические мачты высотой в несколько сотен метров представляют собой уникальные сооружения, существующие в единичных экземплярах. Наиболее точные данные о вертикальных

распределениях температуры, влажности, скорости и направления ветра получают с помощью шаров-зондов, использующих контактные методы измерений. Такие измерения производятся 1-2 раза в сутки с аэрологических станций, расположенных на расстояниях в сотни километров друг от друга. Это не позволяет получить достоверную информацию о текущем состоянии атмосферы в подверженном изменчивости пограничном слое в локальных точках, представляющих интерес с точки зрения метеорологического и экологического мониторинга. Кроме того, такие измерения происходят, как правило, с потерей измерительной аппаратуры, стоимость которой составляет от 80 до 250 долларов США (не считая стоимости средств подъема аппаратуры, таких как оболочки, гелий или водород для наполнения и т.д.).

Альтернативой или в дополнение к известным методам и средствам может служить автоматизированный средства метеорологического обеспечения на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). [3-6]. Такие средства позволят реализовать измерения пространственных распределений всей совокупности важнейших метеорологических параметров атмосферы, таких как температура, давление, влажность, скорость и направление ветра и не только их. При необходимости на борту летательного аппарата может быть установлены приборы для определения газового и аэрозольного состава атмосферы, концентрации загрязняющих примесей, радиационного фона, аппаратура для точного определения нижних и верхних границ облачности, электрофизических параметров атмосферы и многое другое. Использование контактных методов на борту летательного аппарата позволит производить измерение распределения параметров атмосферы с максимально возможной точностью и с высоким пространственным разрешением.

Развитие современных и перспективных технологий позволяет сегодня БПЛА успешно выполнять такие функции, которые в прошлом были им недоступны или выполнялись другими силами и средствами. Беспилотные летательные аппараты показали свою высокую эффективность во многих сферах хозяйственной деятельности и обеспечения безопасности государства. Вместе с тем, возникает необходимость в использовании их для пространственно-временной детализации таких метеорологических величин как температура, давление, влажность, скорость и направление ветра. Это связано в первую очередь с значительной изменчивостью метеоэлементов в пограничном слое атмосферы, которая в свою очередь обуславливает развитие многих опасных явлений погоды и определяет экологическую обстановку на исследуемой территории.

Применение существующих технологий, основанных на использовании сети наземных измерений, а также данных дистанционного зондирования (лидарных, радиолокационных, спутниковых, акустических и т.д.) не позволяют с достаточной для практики степенью точности восстанавливать поля этих метеовеличин [7]. Поэтому необходимо искать новые подходы, основанные на применении БПЛА и совершенствовать их метеорологическую нагрузку – бортовые средства измерения метеопараметров.

Беспилотная авиация имеет огромный потенциал: мониторинг погодных условий с точки зрения безопасности (при наличии опасных явлений погоды), экономичности (час полета БПЛА существенно дешевле часа полета пилотируемого летательного аппарата, да и стоимость самого комплекса несравнимо меньше), объективности (отсутствует субъективная оценка погоды экипажем), наглядности и оперативности (руководящий и летный состав, специалисты метеослужбы имеют возможность в интерактивном режиме отслеживать погодные условия в районе нахождения БПЛА и в зависимости от складывающейся обстановки корректировать программу

метеорологических наблюдений). Для реализации этого потенциала необходимо максимально использовать технические возможности беспилотных комплексов.

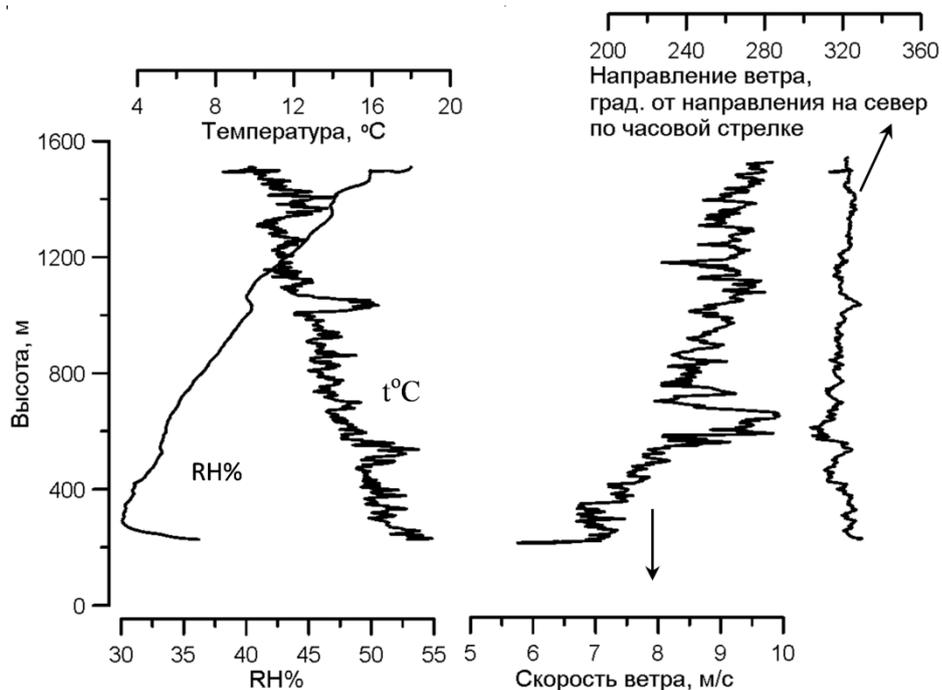
В ФГБУ «ЦАО» в течение ряда последних лет проводятся работы по разработке методов и средств мониторинга атмосферы на базе беспилотных летательных аппаратов. [8-13]. Для измерения пространственных распределений параметров атмосферы в ФГБУ «ЦАО» были разработаны образцы метеорологических зондов на базе БПЛА различных типов. Использовались БПЛА как самолетного, так и мультироторного типов. БПЛА самолетного типа имеют большой ресурс полета и, как правило, большую грузоподъемность при аналогичных весогабаритных характеристиках. Однако для БПЛА самолетных типов достаточно сложно автоматизировать процесс измерений. Существующие доступные системы автопилотирования, осуществляющие взлет летательного аппарата и его полет по заданному маршруту не позволяют совершить посадку БПЛА самолетного типа в автоматическом режиме. Как правило, приземление таких летательных аппаратов происходит с помощью парашюта, что создает некоторые неудобства для их использования. Для БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой имеется возможность полностью автоматизировать процесс проведения измерений. Взлет, подъем, полет по требуемому маршруту и посадка летательного аппарата может быть осуществлена по заранее заданной программе. Оператору в этом случае достаточно подать команду на взлет. Дальнейший полет, проведение измерений и посадка будут выполнены в полностью автоматическом режиме. Такие системы как нельзя лучше подходят для создания средств измерения вертикальных распределений параметров атмосферы, а также для метеорологического и экологического обеспечения экологически опасных объектов.

Для разработки метеорологических зондов на базе БПЛА были использованы летательные аппараты как самолетного, так и вертолетного (мультикоптерного) типа. Так как аппаратура для измерения метеопараметров имеет небольшие габариты и вес, возможно использование сверхлегких летательных аппаратов. Вес БПЛА самолетного типа, использованного для создания метеорологического зонда, около 3 кг. Продолжительность полета составляла около 1 часа, высота полета – более 3000 м. Летательный аппарат имел систему автопилотирования, позволяющую летать по заранее заданной траектории. Бортовая система измерения метеопараметров выполнена на базе следующих датчиков: датчик температуры – термистор 30 кОм размером 0,2 мм, датчик давления – МРХ 4115 (Motorola) датчик влажности – НН-4000 (Honeywell). Уменьшение влияния скорости движения летательного аппарата на процесс измерений было достигнуто за счет использования воздушного насоса, создающего постоянный поток воздуха через датчики температуры и влажности. Дальнейшее повышение точности измерений может быть достигнуто за счет измерения скорости набегающего потока и использования соответствующих поправок, аналогичных тем, которые используются при самолетных измерениях температуры. При этом погрешности измерения температуры не должны превышать 0,5°C. Погрешности измерения давления составляли не более 1,5 %, погрешности измерения относительной влажности – 3%. С помощью данного метеозонда были измерены распределения метеопараметров на высотах до 3000 м. Грузоподъемность летательного аппарата составляет 1 кг, так что при необходимости на его борту могут быть установлена дополнительная измерительная аппаратура, в частности, малогабаритные приборы для измерения газового и аэрозольного состава атмосферы. Некоторое неудобство использования данного метеозонда является необходимость обладать некоторым опытом пилотирования БПЛА для осуществления посадки после проведения измерений.

Преимуществом метеозондов на базе беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа является возможность полностью автоматизировать процесс измерений пространственных распределений параметров атмосферы. Современные системы автопилотирования позволяют обеспечить полеты летательного аппарата по заранее заданной программе, включая взлет и посадку. Для использования таких средств не обязательно иметь опыт пилотирования беспилотных летательных аппаратов. В ФГБУ «ЦАО» разработан действующий макет метеорологического зонда на базе летательного аппарата мультироторного типа [11].

Вес метеорологического зонда - около 1 кг, вес полезной нагрузки – 200 г. Полный комплект оборудования, включая наземную станцию, не превышает нескольких килограммов. Высота подъема – до 1500 м и выше. Время измерения вертикальных распределений метеопараметров – 10 – 15 мин. Метеорологический зонд запускается с земли, дальнейший полет и приземление происходят в автоматическом режиме. Данные записываются в бортовую систему сбора информации, они могут также передаваться в реальном времени на наземную станцию. При необходимости на борт БПЛА может быть установлена аппаратура для измерения газового и аэрозольного состава атмосферы, определения границ облачности и т.д. Система автопилотирования летательного аппарата позволяет планировать маршрут полета. В состав бортовой системы автопилотирования входят GPS модуль, гироскоп и компас, показания которых могут быть записаны на карту памяти и передаваться на наземную станцию. Управление аппарата заключалось только в подаче команды на взлет, дальнейший полет, а также возвращение аппарата в точку вылета и его приземление происходили в автоматическом режиме без участия оператора. Программа, по которой происходил полет, состояла в подъеме аппарата вертикально вверх на заданную высоту с заданной скоростью подъема, спуск с заданной скоростью и приземление в точку вылета. На борту летательного аппарата была установлена измерительная аппаратура, содержащая датчики температуры, давления и влажности. Для уменьшения влияния пропеллеров на процесс измерений датчики были установлены в центре летательного аппарата. Так же, как и в случае метеорологического зонда на базе БПЛА самолетного типа, для повышения точности измерений была предусмотрена принудительная прокачка воздуха через датчики с помощью микронасоса, создающего постоянный поток воздуха 0,5 л/мин. Скорость и направление ветра может быть измерено разными способами, в частности, путем измерения дифференциальных давлений за пределами зоны, возмущенной работой пропеллеров.

В результате проведенных исследований показана возможность создания автоматизированного метеорологического зонда на базе беспилотного летательного аппарата мультироторного типа. Разработан макетный образец метеорологического зонда, проведены его лабораторные и полевые испытания. Измерены вертикальные распределения метеорологических параметров до высоты 1500 м. Имеется возможность увеличения высоты подъема до 3-5 км при некотором увеличении веса летательного аппарата. Особенностью метеозонда является то, что для его использования не требуется опыта пилотирования беспилотных летательных аппаратов, измерения метеопараметров производятся автоматически. Небольшие габариты и вес обеспечивают его мобильность и возможность использования в любом месте. В частности, данный аппарат с установленной на борту аппаратурой для измерения концентрации загрязняющих примесей, может быть использован для метеорологического и экологического мониторинга потенциально опасных объектов, таких как атомные электростанции, химические заводы и т.д.



**Рис.1. Вертикальные распределения температуры, влажности, скорости и направления ветра, измеренные метеозондом на базе БПЛА мультироторного типа.**

На рисунке 1 приведены некоторые результаты измерений вертикальных распределений метеорологических параметров атмосферы, полученные с помощью метеорологического зонда на базе БПЛА мультироторного типа.

### **Заключение**

Как показали проведенные исследования, использование беспилотных авиационных систем для метеорологических наблюдений позволяет значительно повысить качество получаемой информации за счет повышения точности и пространственного разрешения измерений метеорологических параметров атмосферы. Мобильность таких средств дает возможность проведения локального оперативного контроля метеорологической обстановки в условиях чрезвычайных ситуаций, в местах, не охваченных гидрометеорологическими наблюдениями, в случаях, связанных с повышенной опасностью для жизни и здоровья людей, а также для контроля метеорологической обстановки потенциально опасных объектов, таких как атомные электростанции, химические заводы и других. Такие средства могут быть также использованы для калибровки и контроля параметров дистанционных методов измерений, валидации спутниковых данных и математических моделей.

### **Литература**

1. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений. Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 7. С. 697-704.
2. Локощенко М.А., Перепелкин В.Г., Семенова Н.В. Допплеровские содарные измерения вертикальной составляющей скорости ветра. Метеорология и гидрология. 2003. № 7. С. 40-50.
3. Ситников Н.М., Акмулин Д.В., Борисов Ю.А., Ситникова В.И.\*, Соколов А.О., Улановский А.Э., Чекулаев И.И., Равеньяни Ф. Использование беспилотных

летательных аппаратов для мониторинга атмосферы. Метеорология и гидрология, 2013, № 1, С. 90-99.

4. Aline van den Kroonenberg A. C., Martin T., Buschmann M., Bange J. and Vörsmann P., 2008: Measuring the Wind Vector Using the Autonomous Mini Aerial Vehicle M2AV. J. Atmos. Oceanic Technol.

5. McGonigle A.J.S., Aiuppa A., Giudice G., Tamburello G., Hodson A.J., Gurrieri S., 2008: Unmanned aerial vehicle measurements of volcanic carbon dioxide fluxes. Geophysical research letters, v. 35, L06303, 4 PP.

6. Pereira E., Bencatel R., Correira J., Felix L., Gonsalves G., Morgado J. and Sousa J., 2009. Unmanned Air Vehicles for coastal environmental research. Journal of Coastal Research, SI 56 (Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Coastal Symposium) 1557 – 1561. Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258.

7. Кузнецов И.Е., Первезенцев Р.Е. Методические аспекты восстановления метеорологических полей при комплексном использовании данных радиолокационных и аэросиноптических наблюдений. Навигация и гидрография. – 2016. – № 43. С. 57–62.

8. Ситников Н.М., Акмулин Д.В., Борисов Ю.А., Ситникова В.И., Соколов А.О., Улановский А.Э., Чекулаев И.И., Равеньяни Ф.. Использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга атмосферы. Метеорология и гидрология, 2013, №1, с. 90-99.

9. Ситников Н.М., Борисов Ю.А., Чекулаев И.И., Ефремов Д.И., Акмулин Д.В., Ситникова В.И., Улановский А.Э.. Возвращаемый аэрологический зонд на базе беспилотного или дистанционно пилотируемого летательного аппарата для баллонного зондирования атмосферы. Метеорология и гидрология, 2014, №9, с.90-96.

10. Sitnikov N.M., Borisov Y.A., Akmulin D.V., Chekulaev I.I., Efremov D.I., Sitnikova V.I, Ulanovsky A.E., Popovicheva O.B. Unmanned aerial vehicles (UAV) in atmospheric research and satellite validation. International conference COSPAR 2014, 2-9 August 2014, Moscow.

11. Ситников Н.М., Азаров А.С., Чекулаев И.И., Акмулин Д.В., Ситникова В.И., Катюнин А.Д., Улановский А.Э.. Малогабаритный автоматизированный зонд на базе БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой для метеорологического обеспечения экологически опасных объектов. В сборнике докладов научно-практической конференции «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления» (19 – 21 апреля 2016 г., НПО «Тайфун», Обнинск).

12. Ситников Н.М., Чекулаев И.И., Акмулин Д.В., Катюнин А.Д., Ситникова В.И., Улановский А.Э.. Расширение возможностей метеообеспечения условий распространения электромагнитного излучения в атмосфере за счет использования беспилотных летательных аппаратов. Тезисы IX Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», 23-25 ноября 2015 года, ИРЭ, Москва, с.81-85.

13. Горелик А.Г., Коломиец С.Ф., Ситников Н.М., Повышение информационных возможностей метеорологической радиолокации за счет применения малогабаритных летательных аппаратов (МБПЛА), оснащенных контактными, радиоволновыми и оптическими датчиками. Материалы IX Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» 23-25 ноября 2015 года, ИРЭ, Москва, с.260-263.