

Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы

С.А. Кураков¹, В.В. Зуев^{1,2*}

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

² *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

Поступила в редакцию 10.05.2016 г.

Предложен метод измерения вертикальных профилей метеопараметров с помощью портативной автоматической электронной метеостанции, установленной на беспилотном летательном аппарате (ПЭМС–БПЛА). Дано описание аппаратуры, приведены результаты полевых испытаний, рассмотрены перспективы развития ПЭМС–БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, портативная метеостанция, вертикальные профили метеопараметров атмосферы; unmanned aerial vehicle, portable weather station, vertical profiles of the meteorological parameters of the atmosphere.

Введение

В исследовании наиболее динамичного пограничного слоя атмосферы (ПСА) важное место занимают методы оперативного получения информации о вертикальных профилях метеопараметров с высоким пространственным и временным разрешением. Они необходимы для уточнения прогнозов погоды в региональном масштабе, а также для контроля загрязнения окружающей среды. Высокую оперативность и пространственное разрешение измерений вертикальных профилей метеопараметров могут обеспечить современные лазерные и радиоволновые методы дистанционного зондирования атмосферы. Но они, как правило, дорогостоящие и требуют в эксплуатации высококвалифицированный персонал. Кроме того, лазерные методы имеют существенные ограничения по метеоусловиям измерений, их эффективность обычно резко снижается в дневное время суток. Спутниковые дистанционные методы имеют низкую точность и плохое вертикальное разрешение в ПСА.

На текущий момент основной объем измерений профилей метеопараметров обеспечивается радиозондами [1]. Но запуски шар-зондов осуществляются, как правило, два раза в сутки, что, естественно, недостаточно для описания быстротекающих процессов в ПСА. Кроме того, к существенным недостаткам шар-зонда относятся случайный характер траектории полета в зависимости от ветра и, как следствие, одноразовость измерений.

В качестве управляемой летательной платформы для контактных измерителей метеопараметров предлагается использовать радиоуправляемый беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Благодаря современному технологическому развитию БПЛА и электронных систем управления становится возможным проводить контактные измерения метеопараметров практически во всем высотном диапазоне ПСА с высоким временным и пространственным разрешением. Если в качестве БПЛА использовать микрокоптер, появляется возможность перемещаться по строго заданному маршруту, в том числе зависать в определенных точках.

Аппаратура

В ИМКЭС СО РАН разработан лабораторный макет портативной автоматической электронной метеостанции (ПЭМС) на базе созданной ранее системы автономного мониторинга [2]. Основные характеристики ПЭМС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики ПЭМС

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Погрешность
Температура воздуха [3] T , °C	- 54 ... + 55	$\pm 0,2$ при $T \leq 30$ °C $\pm 0,3$ при $T > 30$ °C
Относительная влажность воздуха [4], %	0 ... 100	$\pm 2,5$ при $T > 0$ °C ± 5 при $T < 0$ °C
Атмосферное давление [5], ГПа	500 ... 1100	$\pm 0,5$ разрешение 0,0025

* Сергей Анатольевич Кураков (ksa@imces.ru); Владимир Владимирович Зуев (vvzuev@imces.ru).

Данные измерений ПЭМС передаются по радиоканалу [6] на частоте 2,4 ГГц в наземный компьютер. Автономность ПЭМС обеспечивается питанием литий-ионным аккумулятором 3,6 В во временном интервале около 8 ч. Контроль заряда и защитное отключение при критическом напряжении аккумулятора происходят в автоматическом режиме.

Портативная автоматическая электронная метеостанция устанавливалась на двух типах микрокоптеров: сначала на квадрокоптере МК Quadro XL [7] (Германия), затем на гексакоптере DJI модель S900 [8] (Китай). Основные технические характеристики микрокоптеров приведены в табл. 2. Внешний вид микрокоптеров и ПЭМС показаны на рис. 1.

Первоначальная задача состояла в выяснении принципиальной возможности измерения профилей метеопараметров атмосферы с помощью микрокоптера, в том числе в поиске мест расположения датчиков и оптимальной схемы измерений с учетом возмущений окружающей атмосферы струями работающих двигателей. В квадрокоптере ПЭМС устанавливалась на концах горизонтальных штанг на расстоянии 0,7 м от двигателей (рис. 1, а). Такой вынос метеодатчиков от двигателей обеспечивал в большинстве ситуаций минимизацию влияния струйных потоков квадрокоптера, но из-за укрупнения габаритов и веса увеличивалась парусность и уменьшалась безопасность посадки устройства. В новом варианте датчики температуры и влажности были размещены на высоте около 0,5 м над плоскостью вращения винтов гексакоптера (рис. 1, б). Датчик давления установлен на печатной плате, размещаемой в нижней части цилиндра вертикального штока (рис. 1, в). Там же установлена антенна передающей части радиомодуля связи, обеспечивающего

передачу данных на наземную станцию. Наземная станция состоит из внешней направленной антенны, блока согласования интерфейсов и мобильного компьютера (рис. 1, г). В корпусе блока согласования размещается печатная плата, на которой располагается микросхема USB-интерфейса с разъемом, стабилизатор 3,3 В и модуль XBee радиointерфейса. Наземное оборудование достаточно компактно и может переноситься оператором.

На рис. 1, д запечатлен рабочий полет ПЭМС–БПЛА. Для установки и контроля маршрута полета используется мобильный компьютер, позволяющий, в том числе, с использованием функции «полет по точкам» проводить измерения вне зоны действия радиосвязи. Одной из функций автопилота является удержание позиции гексакоптера в одной точке. В функции автопилота также входят автоматический возврат гексакоптера в точку старта при потере связи с пультом управления и безопасная автоматическая посадка при критическом снижении напряжения аккумулятора.

Система связи обеспечивает отображение телеметрии на дисплее. В качестве дисплея может выступать обычный смартфон. Фиксируются: высота, скорость полета микрокоптера, координаты, показания компаса и гироскопа, состояние аккумуляторной батареи, режимы работы навигатора и автопилота. Система крепления аккумулятора позволяет оперативно менять элементы питания.

Полевые испытания показали, что корректные измерения вертикальных профилей метеопараметров могут проводиться только на этапе подъема ПЭМС–БПЛА, при спуске погрешности возрастают вследствие попадания на датчики воздушных потоков, прошедших через разогретые двигатели.

Т а б л и ц а 2

Технические характеристики микрокоптеров

Параметр	Квадрокоптер МК Quadro XL	Гексакоптер DJI модель S900
Количество роторов	4	6
Размах по осям, мм	735	900
Максимальный полетный вес, кг	5	8,2
Полезная нагрузка, кг	2,5	3,2
Тип используемых аккумуляторов	LiPo (4S, 5000mAh, 55C)	LiPo (6S, 15500mAh, 55C)
Максимальная потребляемая мощность, кВт	2	3
Среднее время полета, мин	20	35
Точность зависания (в режиме GPS)		
вертикальная, м	0,5	0,5
горизонтальная, м	2,5	2,5
Рабочая температура окружающей среды, °C	–5 ... +35	–10 ... +40
Максимальный ток одного двигателя, А	40	40
Минимальное количество видимых спутников для включения режима GPS	5	5
Максимальная вертикальная скорость, м/с	+8 ... –18	±5
Максимальная горизонтальная скорость, м/с	20	22

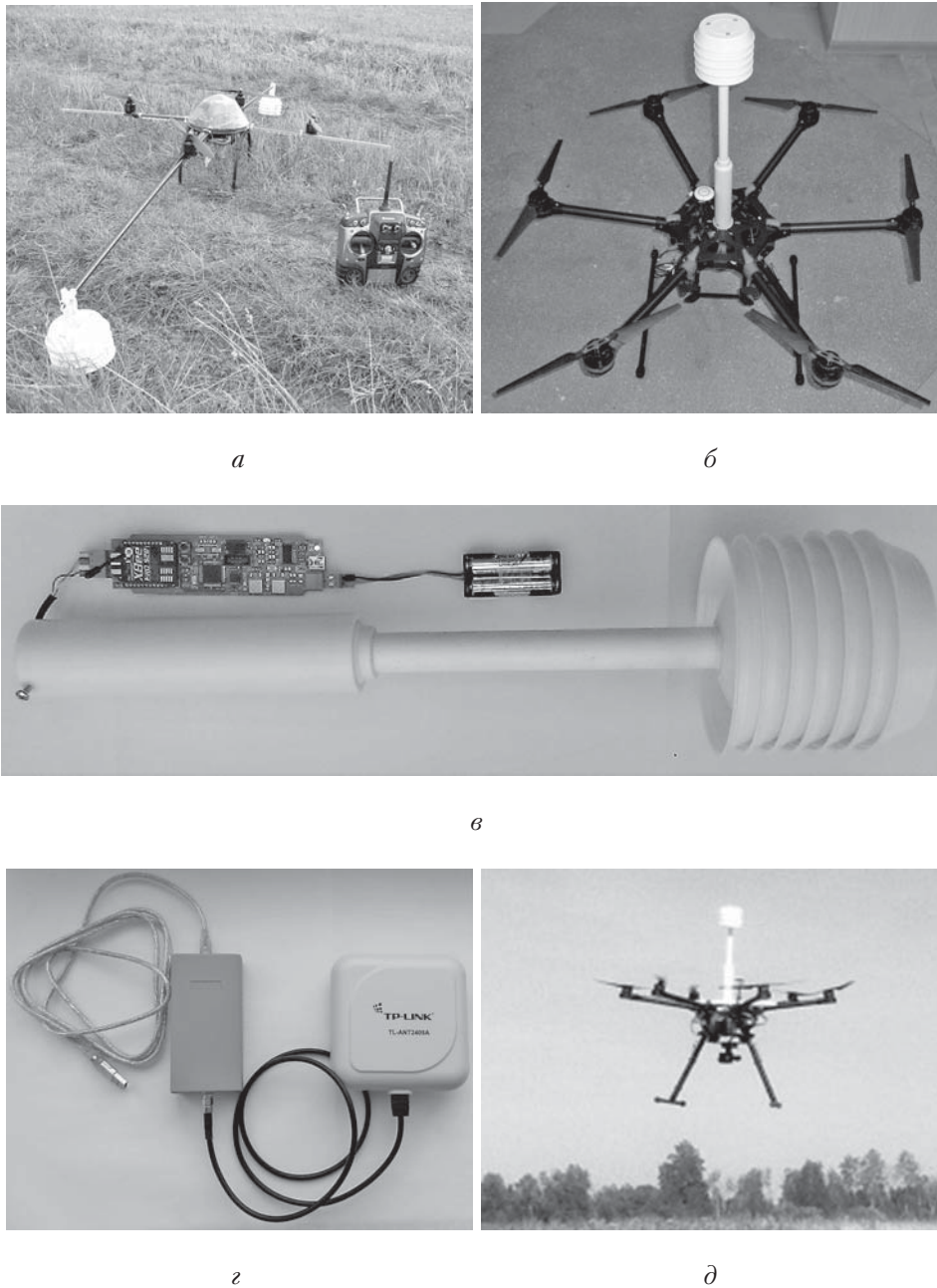


Рис. 1. ПЭМС–БПЛА: *а* – расположение на квадрокоптере МК Quadro XL на штангах длиной 0,7 м; *б* – расположение на гексакоптере DJI (модель S900) на штоке высотой около 0,5 м; *в* – ПЭМС с извлеченными из корпуса платой измерительного блока и элементами питания; *г* – блок согласования интерфейсов (слева) и внешняя направленная антенна (справа); *д* – ПЭМС–БПЛА в полете

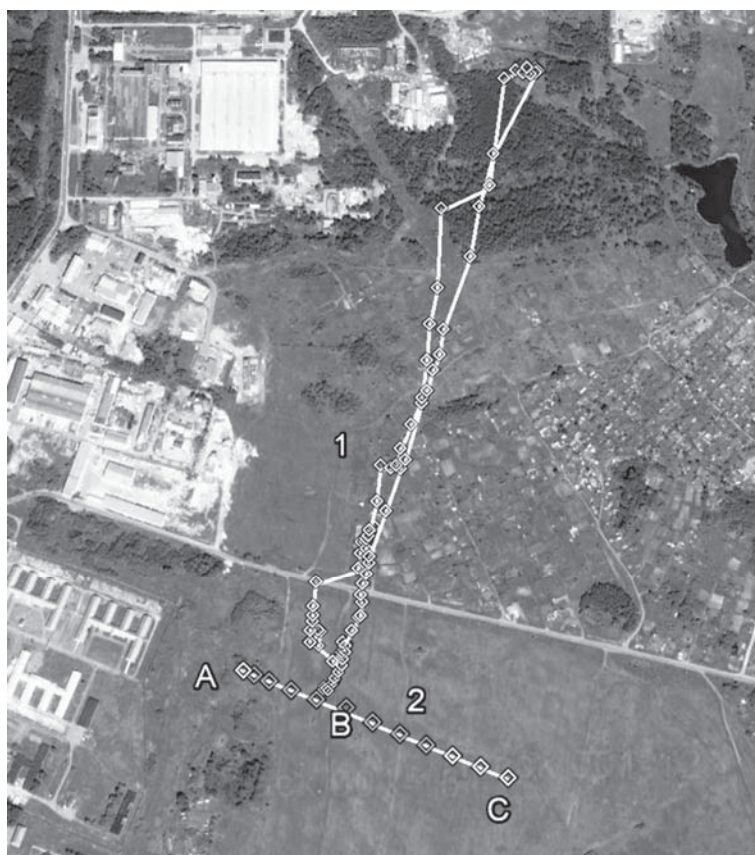
Результаты полевых испытаний ПЭМС–БПЛА

На рис. 2 с помощью сервиса Google Earth показаны траектории полетов ПЭМС–БПЛА, проводимых 14 августа 2012 г. на базе квадрокоптера МК Quadro XL (рис. 2, *а*) и 1 и 2 сентября 2015 г. на базе гексакоптера DJI модель S900 (рис. 2, *б*). Полеты проводились над полем недалеко от Томского академгородка в 7 ч вечера местного времени.

Квадрокоптер согласно программе полета подымался на высоту 1100 м (рис. 2, *а*, проекция сверху, с южной стороны), делая 10-секундные зависания на высотах 10, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600 и 800 м. Время подъема до этой высоты составило 5,5 мин при средней скорости 3,3 м/с. На спуск понадобилось 3 мин. Траектория № 1 на рис. 2, *б* отображает точки полета гексакоптера до высоты 1972 м. Время подъема БПЛА до этой высоты составило 11 мин при средней скорости 3 м/с. Время спуска – около 10 мин.



a



b

Рис. 2. Карта Google Earth с траекториями полетов: *a* – 14 августа 2012 г.; *b* – 1 и 2 сентября 2015 г.

Траектория № 2 на рис. 2, б отображает горизонтальную трассу полета гексакоптера на высоте 40 м для измерений скорости и направления ветра. Для этого гексакоптер в точке «А» был переведен в режим удержания высоты и горизонтального положения. Для улучшения стабильности полета и уменьшения влияния несимметричности конструкции на ее парусность он был закручен вокруг вертикальной оси с периодом 5 с. Под воздействием ветра аппарат стал ускоряться, а в точке «В» его скорость стабилизировалась и стала соответствовать средней скорости ветра. С помощью программы Google Earth определялось направление (248°) и расстояние (298 м) между точками «В» и «С». Зафиксированное время полета гексакоптера между этими точками составило 30 с. Таким образом, измеренная на высоте 40 м средняя скорость ветра равна 9,9 м/с в направлении 248°, что согласуется с метеоситуацией на 1 сентября 2015 г. Проведенные измерения показали, что данный способ может быть предложен для измерения средних характеристик ветра на выбранных высотах ПСА в пределах доступной дальности полета.

На рис. 3 изображены вертикальные профили давления P , температуры T и относительной влажности r , измеренные с помощью ПЭМС–БПЛА 14 августа 2012 г. до высоты $H = 1100$ м.

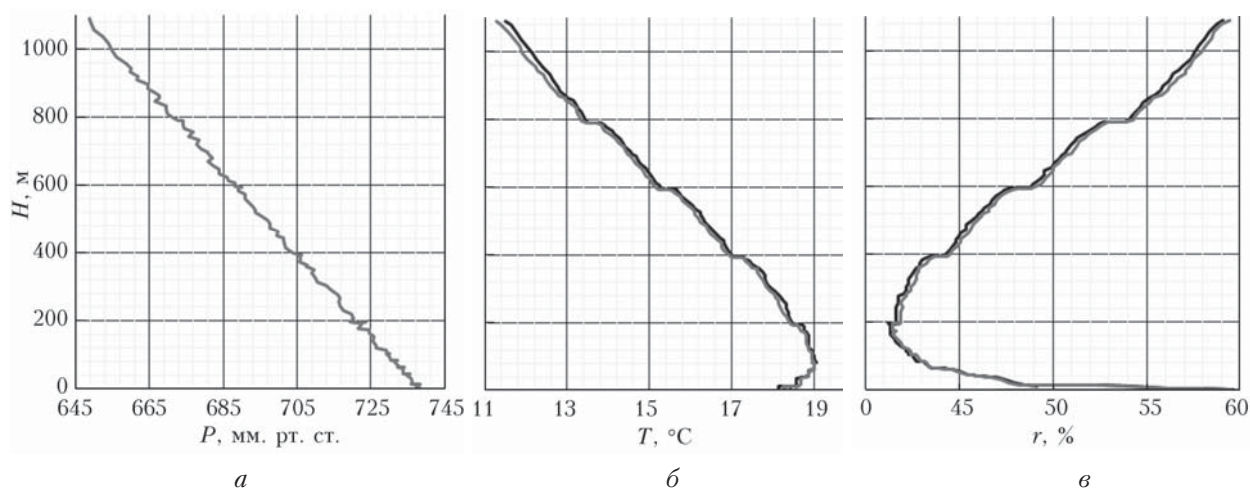


Рис. 3. Вертикальные профили: a – давления; b – температуры и v – влажности воздуха, измеренные в процессе полета ПЭМС–БПЛА 14 августа 2012 г.

Раздвоенные кривые на рис. 3, b и v демонстрируют показания двух датчиков температуры и влажности, установленных на обоих концах горизонтальной штанги. Ступеньки в профилях отражают 10-секундные зависания. Видно, что систематические отклонения показаний датчиков температуры и влажности наблюдались при подъеме ПЭМС–БПЛА, а при зависании показания сравнились. Вероятнее всего, это связано с турбулентным перемешиванием окружающего воздуха под действием струй работающих двигателей. Отметим, что максимальные отклонения показаний датчиков не выходили за пределы погрешностей измерений метеодатчиков (см. табл. 1).

Заключение

Проведенные полевые испытания показали, что ПЭМС–БПЛА может измерять строго вертикальные профили метеовеличин в отличие от шар-зонда, на траекторию которого оказывает влияние ветер. Вертикальное разрешение зависит от скорости подъема и постоянной времени используемых метеодатчиков (~1 с). Во время полевых испытаний вертикальное разрешение составляло 10–15 м. Выше 2 км полеты не производились, но полученные полетные данные позволяют оценить достижимую высоту измерений с помощью данного БПЛА в 3 км. При этом время подъема составит около 17 мин, а на спуск потребуется до 8 мин. Микрокоптер достаточно оперативно может быть запущен несколько раз по заданной трассе, что позволит отслеживать динамику измеряемых профилей метеопараметров. Для сокращения времени регистрации быстротекущих процессов в атмосфере предлагается использовать одновременно несколько микрокоптеров по схеме «воздушной этажерки».

Для дальнейшего развития описанного метода измерений профилей метеопараметров планируется путем доработки конструкции и использования более емких и легких аккумуляторов увеличить время, дальность и высоту полета ПЭМС–БПЛА.

Герметизация электронных узлов и использование защитного корпуса должны обеспечить всепогодность. За счет применения более совершенной системы навигации и автопилотирования, включая доработку программного обеспечения собственными силами, предполагается проводить полеты полностью в автоматическом режиме и принципиально повысить их безопасность. В частности, установка ультразвуковых датчиков позволит уклоняться от препятствий и аккуратно приземляться. Кроме того, ведутся работы по установке на БПЛА миниатюрных датчиков атмосферных газов, в частности датчика CO_2 для измерения вертикального распределения газового состава атмосферы в пределах ПСА.

Полученные результаты полевых испытаний позволяют рассматривать ПЭМС—БПЛА как эффективное средство для верификации дистанционных методов зондирования атмосферы на реальной вертикальной атмосферной трассе, где наиболее сильно выражены градиенты измеряемых параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2016 годы» (Соглашение № 14.607.21.0030, уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60714X0030).

1. *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений.* Женева: ВМО, 2014. 788 с.

2. *Кураков С.А.* Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. Т. 155, № 4. С. 29—32.

3. *Discrete* RTD Sensors — 701-101BAA-B00. URL: http://sensing.honeywell.com/product-page?pr_id=53651

4. *Covered* filtered integrated humidity sensor H1H-5031-001. URL: <http://sensing.honeywell.com/H1H-5031-001-Humidity-Sensors>

5. *Miniature* I2C Digital Barometer 50 to 110 kPa, 2.375V to 5.5V. URL: http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MPL115A&fsrch=1&sr=1

6. *MODULE* ZIGBEE-PRO W/WIRE ANT XBP24BZ7WITB003. URL: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module#docs>

7. *MK-QuadroKopter.* URL: <http://wiki.mikrokopter.de/MK-Quadro>

8. *SPREADING WINGS* S900. URL: <http://www.dji.com/product/spreading-wings-s900/info#specs>

S.A. Kurakov, V.V. Zuev. **Unmanned aerial vehicle for measuring vertical profiles of the meteorological parameters in the atmospheric boundary layer.**

A method for measuring vertical profiles of meteorological parameters using a portable automatic electronic weather station mounted on an unmanned aerial vehicle (PEWS—UAV) is proposed. Facility description and the results of the field test are presented, and PEWS—UAV development prospects are discussed.