

## Исследование динамики пограничного слоя атмосферы с использованием беспилотных летательных аппаратов

М.И. Варенцов<sup>1,2</sup>, А.Ю. Артамонов<sup>1</sup>, А.Д. Пашкин<sup>1,2</sup>, И.А. Репина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

### Введение

Мониторинг метеорологических условий (температуры, влажности, ветра и т.д.) внутри атмосферного пограничного слоя (АПС) необходим для решения различных задач в области метеорологии, исследования динамики и состава атмосферы, процессов взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности, усовершенствования моделей прогноза погоды и изменений климата. Но, несмотря на многочисленные измерительные кампании, потребность в экспериментальных данных остается актуальной. В основном, измерения проводятся на мачтах и метеорологических башнях и охватывают только приземный слой высотой до нескольких десятков метров (*Jonassen et al. 2015; Kral et al. 2018*). Напротив, аэрологическое зондирование не разрешает тонкий приземный слой, на сетевых станциях проводится 1-2 раза в сутки, а повышение дискретности измерений требует больших затрат. Приборы дистанционного зондирования (содары, лидары, температурные профиломеры) также плохо разрешают приземный слой, дороги в эксплуатации и имеют ряд ограничений (*Эзау и др. 2013; Beyrich 1997; Lang, McKeogh 2011*).

Стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) открывает новые и широкие возможности для метеорологических измерений в АПС. Существует два основных типа БПЛА: самолеты и многооторные вертолеты (обычно создаваемые по схеме квадрокоптера или октокоптера, далее называемые мультикоптерты). Ключевыми преимуществами мультикоптеров по сравнению с беспилотными самолетами являются маневренность, способность зависать над данной точкой, а также взлетать или приземляться в ограниченном пространстве. Их недостатками является относительно малое время полета (обычно не более 30 минут на одной батарее) и соответствующие ограничения по дальности и потолку полета.

В настоящее время мультикоптеры широко используются в сельскохозяйственном (*Patel et al. 2013; Roldán et al. 2015*) и лесном мониторингах (*Денисов и др. 2016*), для создания цифровых моделей рельефа высокого разрешения (*Воскресенский et al. 2018; Afayi et al. 2017*), для оценок глубины снега (*Cimoli et al. 2017*) и для мониторинга и картирования температуры поверхности земли и водных объектов с использованием инфракрасных фотокамер и радиометров (*DeMario et al. 2017; Li et al. 2018; Nishar et al. 2016; Patel et al. 2013*).

БПЛА разных типов являются многообещающим инструментом для атмосферных измерений, а именно для исследований вертикального или горизонтального распределения температуры, влажности, скорости ветра, характеристик атмосферной турбулентности и т.д. Методика таких измерений разработана и хорошо протестирована для беспилотных самолетов по результатам многочисленных измерительных кампаний (*Boer et al. 2018; Jonassen et al. 2015; Kral et al. 2018; Spiess et al. 2007; Wildmann et al. 2017*). Опыт подобных измерений с использованием мультикоптеров меньше, вероятно, из-за более жестких ограничений по времени и дальности полета. Но, в отличие от беспилотных самолетов, мультикоптеры способны выполнять строго вертикальные разрезы и совершать полеты на малой скорости, что способствует уменьшению инерции датчиков (*Jonassen et al. 2015*).

Ранее мультикоптеры были использованы для атмосферных измерений в нескольких полевых кампаниях, включая полевые экспериментальные измерения в Арктике (*Kral et al. 2018*), исследование вертикальной структуры городского острова тепла Сингапура (*Chow, Ho 2016*) и измерения на антарктических станциях (*Jonassen et al. 2015*). Тем не менее, многие

методологические вопросы измерений остаются нерешенными и обсуждаемыми, включая вопросы об оптимальном расположении датчиков (Roldán et al. 2015), об инерции датчиков и о дополнительных атмосферных возмущениях, вызываемых мультикоптером в полете.

В данной работе показан опыт измерений, выполненных с использованием квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro в зимних условиях. БПЛА был оснащен метеорологическими датчиками и использовался для измерений на вертикальных и горизонтальных разрезах в АПС.

## 1. Данные и методы

### 1.1. Измерительная система на базе квадрокоптера

Нами использован популярный «массовый» квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro. Его максимальная высота полета программно ограничена высотой 500 м, горизонтальный диапазон - 1-2 км, время полета на одной батарее составляет около 25 минут. Квадрокоптер оснащен набором датчиков iMet-XF производства International Met Systems (<http://www.intermetsystems.com>). Он включает в себя центральную плату со встроенным датчиком давления и несколькими внешними датчиками, в том числе датчиком температуры и влажности воздуха EE03, термистор NTC (Negative Temperature Coefficient), инфракрасный датчик температуры поверхности и приемник GPS (табл. 1). Система может быть дополнена и другими совместимыми датчиками.

Данные от датчиков собираются на центральную плату и передаются на последовательный выход с частотой 1 Гц. Для записи данных на карту Micro SD использован регистратор (дата-логгер) Logomatic v2 производства SparkFun Electronik (<https://www.sparkfun.com/>). Система питается от внешнего аккумулятора (напряжение 5 В). Центральная плата iMet-XF, регистратора данных и аккумулятор размещены в пластиковой коробке, установленной на шасси с правой стороны квадрокоптера.

Таблица 1

Список и характеристики датчиков, используемых в рамках системы iMet-XF.

Название и тип датчика	Производитель	Диапазон измерений	Точность	Время отклика
Датчик давления, встроенный в центральную плату iMet-XF	International Met Systems	10–1200 гПа	±0.24 гПа	8 мс
Датчик температуры воздуха (термистор NTC Shibauro PSB-S5)		-95–50 °C	±0.3 °C	1 с
Температура воздуха (Т) и влажность (RH) с полимерным сенсором HC103 модуль EE03	E+E Electronik	-40–80 °C (Т) 0-95% (RH)	±0.3 °C (Т), ±3 % (RH) при 20°C	1 с
Инфракрасный термометр (IR)	Melexis	-50–125 °C	±0.3 °C	1 с
GPS приемник (CAM-M8Q)	UBlox	-	-	-

Результаты измерений, выполняемых на базе летательных аппаратов, чувствительны к расположению датчиков относительно воздушного потока и, соответственно, к методу их расположения. Но для мультикоптеров единая методика установки датчиков относительно корпуса аппарата и его пропеллеров пока отсутствует. Одним из возможных вариантов установки датчиков является их монтаж на горизонтальной трубе за пределами области воздействия пропеллеров (Kral et al. 2018) или сверху, на вертикальной стреле над летательным аппаратом, что может уменьшить влияние вращающихся пропеллеров (Jonassen et al. 2015). С другой стороны, установка датчиков непосредственно выше или позади одного из пропеллеров способствует лучшей вентиляции (Kral et al. 2018). В нашем исследовании датчики NTC и EE03 были помещены в конце пластиковой трубки под левым задним пропеллером близко друг к другу. Датчик NTC был отделен на ≈5 см от модуля EE03 и

выдвинут на несколько мм из металлического корпуса. Датчик ИК-температуры был установлен в центральной части пластиковой трубки и направлен на поверхность.

### 1.2. Экспериментальные кампании

1.2.1. *Беломорская кампания.* Измерительная система на базе квадрокоптера использовалась в рамках полевой экспериментальной кампании, проходившей на территории Беломорской биологической станции (ББС) Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова на побережье Белого моря (66,554 ° с.ш., 33,104 ° в.д.) в феврале 2018 г. Целью проводимых на биостанции измерений является исследование атмосферной турбулентности в неоднородном ландшафте (Barskov et al. 2017). Измерительная система на пирсе ББС включала автоматическую метеорологическую станцию (АМС) Vaisala WX150 и микроволновый температурный профилимер (сканирующий радиометр) МТР-5НЕ (Эзау и др., 2013; Кадыгров, Пик, 1998). Профилимер осуществлял измерения вертикального профиля температуры на высотах до 1000 м с 5-минутной частотой сканирования и вертикальным разрешением 50 м.

Во время измерений наблюдались различные погодные условия, в том числе ясная и безветренная погода с интенсивными приземными температурными инверсиями. Основное время измерений солнце было ниже горизонта или наблюдались облачные условия, поэтому датчики не подвергались воздействию прямого солнечного нагрева.

Проводились следующие виды измерений:

1. Полеты в фиксированной точке вблизи АМС над пирсом выполнялись для калибровки датчиков и изучения возмущений, вызванных движением винтов.

2. Вертикальные разрезы над пирсом проводились в пределах нижних 500 м с целью получения вертикальных профилей влажности и температуры, и сравнения последних с данными профилимера МТР5-НЕ. Такие полеты проводились дважды в день с 3 по 7 февраля 2018 года. Всего выполнено 10 полетов. Каждый заключался в непрерывном подъеме со скоростью примерно 2 м/с, зависание на 30-60 секунд в верхней точке и последующем спуске со скоростью примерно 2 м/с.

3. Серия горизонтальных разрезов была выполнена на разных высотах над незамерзающей полыней в проливе Большая Салма, формирование которой обусловлено локальными течениями. Целью таких полетов было исследование влияния полыни на профили температуры и влажности в атмосфере. Край полыни был удален на 300 м от пирса ББС, ее ширина составляла примерно 500 м.

1.2.1. *Эксперимент в Обнинске.* Дополнительные испытания измерительной системы на базе квадрокоптера были проведены в городе Обнинск Калужской области (55,11°с.ш., 36,598°в.д.) 11 марта 2018 года вблизи Обнинской высотной метеорологической мачты (ВММ-310, далее – ВММ). Мачта высотой 310 м оборудована датчиками температуры, влажности, скорости и направления ветра на высоте 2, 25, 73, 121, 217 и 301 м над землей (Локощенко и др. 2016; Новицкий и др. 2011). Было выполнено 10 вертикальных разрезов, из них 6 выполнялись так же, как описано выше, а 4 с более низкой скоростью подъема/спуска ( $\approx 1$  м/с) в пределах нижних 250 м. При проведении измерений стратификация атмосферы была близка к адиабатической. Присутствовали облачные условия, и датчики не подвергались воздействию прямого солнечного излучения.

### 1.3. Обработка данных

В рамках разработанного алгоритма обработки данных используются измерения датчиков iMet-XF, а также данные бортового компьютера квадрокоптера, которые доступны для загрузки с помощью программного обеспечения DJI Assistant. Бортовой компьютер ведет запись большого числа параметров, характеризующих состояние двигателей, навигационной системы и т.д. Эти данные используются для определения точных моментов взлета/посадки и как один из источников данных о высоте.

*1.3.1. Определение высоты.* Точное определение высоты над поверхностью является неотъемлемой частью измерений, выполняемых с использованием различных летательных средств. Нами рассмотрено два различных метода определения высоты. Во-первых, высота определяется навигационной системой квадрокоптера и сохраняется в памяти бортового компьютера. Далее будем ее называть высотой ДЛ. Для ее определения используются данные встроенного барометра, GPS и ультразвуковых локаторов (последние – только вблизи поверхности). Во-вторых, барометрическая высота может быть получена из показаний датчика атмосферного давления iMet-XF. Для расчета последней применен итерационный метод, работающий на сетке в барической системе координат:

$$z_i = z_{i-1} - \Delta p / g \cdot \rho_i$$

где  $\Delta p = 0,5$  гПа - шаг вертикальной сетки в барической системе координат,  $\rho_i = p_i / R \cdot T_i$  – плотность воздуха,  $p_i$  и  $T_i$  – давление воздуха и его температура, выраженная в Кельвинах, для  $i$ -го уровня,  $R = 287.058$  - удельная газовая постоянная для сухого воздуха. Используемый в расчетах профиль средней температуры ( $T_{i=1..n}$ ) задается по показаниям датчика NTC (как показано ниже, он характеризуется меньшими погрешностями). При анализе вертикальных разрезов осреднение температуры выполняется отдельно для восходящего и нисходящего сегмента полета.

Сравнение двух методов показало значительное превышение высоты ДЛ над барометрической высотой, до 10% для самых холодных дней (500 м против 450 м для потолка полета). Поскольку квадрокоптер не имеет встроенного датчика температуры, для определения высоты ДЛ используется температурный профиль для стандартной атмосферы. В холодном воздухе вертикальный барический градиент больше, чем для стандартной атмосферы, что объясняется наблюдаемое завышение высоты ДЛ над барометрической высотой, рассчитанной с учетом температуры. Дальнейший анализ использует данные о высоте и вертикальные профили на основе давления, пересчитанные для регулярной вертикальной сетки с шагом 5 м.

*1.3.2. Коррекция инерции датчиков.* Инерция датчиков температуры и влажности является известной проблемой радиозондирования атмосферы (Локощенко и др. 2016; Ivanov et al. 1991) измерений на базе БПЛА (Jacobi et al. 1995; Jonassen et al. 2015). Ее простым решением для вертикальных разрезов могло бы быть осреднение данных измерений, сделанных на восходящем и нисходящем сегменте полета. Но для горизонтальных разрезов и более сложных задач требуется более универсальное решение. Для температуры нами был использован простой метод коррекции инерции, основанный на сдвиге временных рядов:

$$T_1(t) = T_0(t + \Delta t)$$

где  $T_0$  и  $T_1$  являются исходными и скорректированными временными рядами,  $t$  - время, а  $\Delta t$  - значение временного сдвига. Подбор оптимальных значений  $\Delta t$  для датчиков NTC и EE03 исследован в разделе 2.2.

Чтобы учесть коррекцию инерции измерений температуры, дополнительная коррекция была применена к показаниям относительной влажности модуля EE03. Это необходимо, потому что емкостной датчик влажности EE03 реагирует на абсолютное влагосодержание, а для расчета относительная влажность рассчитывается с учетом измеренных значений температуры. С учетом вышесказанного, коррекция относительной влажности определена как:

$$RH_1(t) = RH_0(t + \Delta t_{EE03}) \cdot \frac{E(T_0(t))}{E(T_0(t + \Delta t_{EE03}))}$$

где  $\Delta t_{EE03}$  - инерционная коррекция для модуля EE03 (такая же, как для температуры), а давление насыщенного водяного пара  $E$  рассчитывается по известной формуле Мангуса.

## 2. Результаты

### 1.1. Полеты возле АМС

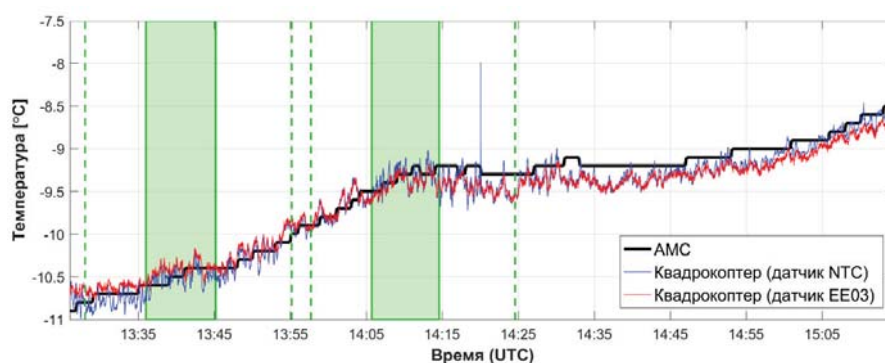
В двух экспериментах на ББС неподвижные измерения с летательным аппаратом, установленным на штативе рядом с АМС, чередовались с полетом в одной точке вблизи АМС. Эти эксперименты проводились при различных погодных условиях с различной скоростью ветра и приповерхностного градиента (табл. 2). Сравнение значений температуры по данным изменений АМС (10-секундная частота) и датчиков на квадрокоптере для 06.02.2018 показано Рис. 1, при этом для датчика ЕЕ03 уже устранена систематическая погрешность относительно датчика NTC. Значение этого систематического смещения ( $\Delta T_{NTC}^{EE03} = T_{EE03} - T_{NTC}$ ) составляет 1,3 °С для рассматриваемого случая и для других случаев варьируется от 1 до 1,4 °С.

Проведенные сравнения не выявили существенных различий между измерениями в полете (П) и в неподвижных условиях (Н) в масштабах изменчивости температуры и влажности, и систематических ошибок для этих величин (табл. 2). Следовательно, можно предположить, что индуцированные полетом квадрокоптера возмущения температуры и влажности намного меньше их естественной изменчивости.

Таблица 2

Погодные условия и статистические характеристики измерений в полете (П) и неподвижных (Н) условиях вблизи АМС.  $V_{AWS}$  – средняя скорость ветра по данным АМС,  $\gamma_{MTP5}$  – средний вертикальный градиент температуры в нижних 100 м по данным МТР-5,  $\sigma$  – стандартное отклонение показаний температуры (Т) и влажности (RH),  $\Delta$  – систематическое смещения между двумя указанными временными рядами

Дата	$V_{AWS}$ [м/с]	$\gamma_{MTP5}$ [°C/100 м]	$\sigma T_{NTC}$ [°C]		$\sigma T_{EE03}$ [°C]		$\sigma RH_{EE03}$ [%]		$\Delta T_{NTC}^{EE03}$ [°C]		$\Delta T_{AWS}^{NTC}$ [°C]		$\Delta RH_{AWS}^{EE03}$ [%]	
			П	Н	П	Н	П	Н	П	Н	П	Н	П	Н
06.02.2018	5.5	-0.78	0.58	0.5	0.51	0.50	0.51	0.50	1.31	1.35	-0.01	0.07	-1.32	-0.77
07.02.2018	1.4	-0.47	0.12	0.1	0.10	0.08	0.10	0.08	1.16	1.13	-0.11	0.19	-2.17	-1.72



**Рис 1.** Сравнение измерений температуры по данным АМС и датчиков на квадрокоптере для измерений в полете и в неподвижных условиях. Периоды измерений в полете выделены зеленым цветом. Пунктирными линиями выделены периоды, для которых рассчитана статистики в табл. 2 (10 минут до взлета и 10 минут после посадки). Для датчика ЕЕ03 устранена систематическая ошибка относительно датчика NTC.

### 2.2 Вертикальные разрезы

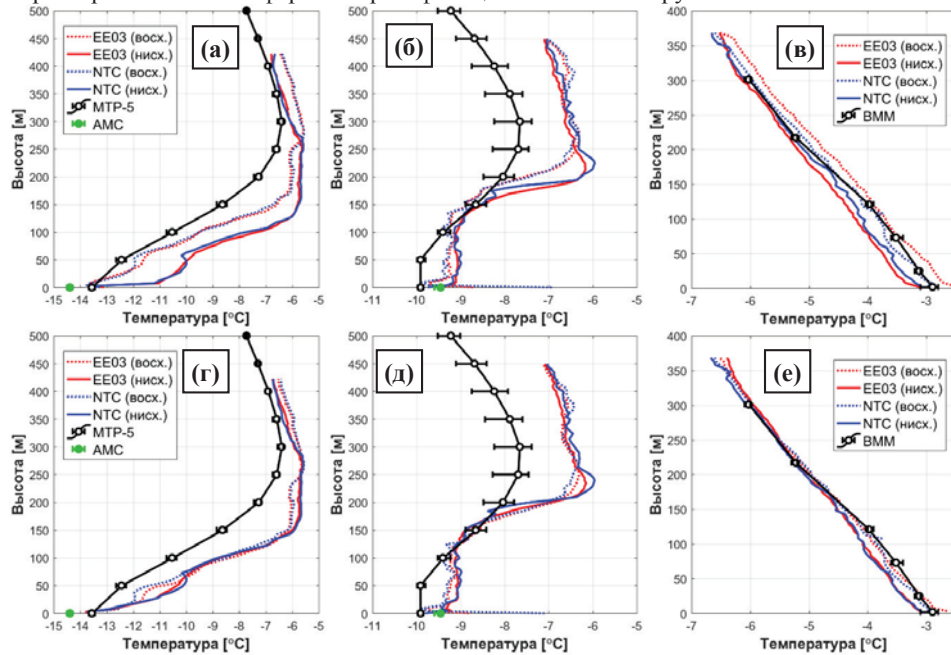
Вертикальные профили температуры, измеренные на ББС и в Обнинске с использованием квадрокоптера, сравнивались с эталонными наблюдениями (МТР-5 и ВММ). Также анализировались различия между восходящими и нисходящими профилями, определяемые, в первую очередь, инерцией датчиков. На рис. 2а-в показаны типичные

различия для профилей температуры, измеренных на восходящем и нисходящем сегментах полета. На рис. 2а видно, что эти различия влияют на оценку такого важного параметра, как высота инверсии. Оптимальные значения временного сдвига  $\Delta t$ , определённого в разделе 1.3.2 и используемого для коррекции инерции, были найдены отдельно для каждого полета, чтобы минимизировать следующую функцию:

$$F = \text{RMSD}(T_{EE03}^{asc}, T_{EE03}^{dsc}) + \text{RMSD}(T_{NTC}^{asc}, T_{NTC}^{dsc}) + \text{URMSD}(T_{NTC}^{asc}, T_{EE03}^{asc}) + \text{URMSD}(T_{NTC}^{dsc}, T_{EE03}^{dsc})$$

где  $\text{RMSD}(T_1, T_2)$  среднеквадратичная разность между профилями  $T_1(z)$  и  $T_2(z)$ ,  $\text{URMSD}$  – среднеквадратичная разность для указанных величин после удаления систематической (средней) ошибки, верхние индексы asc и dsc соответственно обозначают восходящий и нисходящий профили, нижние индексы обозначают тип датчика.

Оптимальное значение  $\Delta t$  зависит от типа датчика и от способа его монтажа. Для первых 6 полетов на ББС с исходной установкой датчиков средние значения  $\Delta t$  равны 9 и 11 с для датчиков NTC и EE03 соответственно. Разделение датчиков друг от друга уменьшает значения  $\Delta t$ , особенно для датчика NTC. Средние значения  $\Delta t$ , осредненные для полетов с разнесенными датчиками (4 полета на ББС и 10 в Обнинске), составляют 1 и 9 секунд для NTC и EE03. Значимых зависимостей между значениями  $\Delta t$  и скоростью подъема/спуска и характеристикам атмосферной стратификации не было обнаружено.



**Рис. 2.** Вертикальные профили температуры, построенные по данным исходных (а,б,в) и скорректированным (г,д,е) измерений датчиков EE03 и NTC для двух полетов на ББС (а, б, г, д) и одного полета в Обнинске (в, е), в сравнении с данными «эталонных» наблюдений (профилимера MTP-5 и BMM), осредненных за время полета. Горизонтальные «усы» указывают диапазон изменчивости для «эталонных» данных за время полета. Коррекция инерции выполнена с использованием среднего  $\Delta t$  (режим C2 из табл. 3). Для датчика EE03 устранена систематическая ошибка относительно датчика NTC.

Восходящие и нисходящие профили температуры, построенные по скорректированным данным измерений (рис. 2г,д,е), показывают лучшее согласие друг с другом, чем профили, построенные по исходным данным (рис. 2а,б,в). Это подтверждается значениями RMSD и коэффициентами корреляции между восходящими и нисходящими профилями температуры и влажности (табл. 3). Для профилей температуры и влажности,

## Турбулентность, динамика атмосферы и климата

построенных по скорректированным данным, RMSD близки к заявленной точности датчиков. Близкие результаты получаются с использованием значений  $\Delta t$ , определенных отдельно для каждого полета (режим C1 в табл. 3), и с использованием средних значений  $\Delta t$  (режим C2 в табл. 3).

Эксперимент в Обнинске показал хорошее согласие между измерениями, выполненными с квадрокоптера, и наблюдениями датчиков на ВММ. Среднее значение RMSD между вертикальным профилями, построенными по данным измерений с квадрокоптера, и данными ВММ после всех поправок составляет 0,33 °C, что близко к заявленной точности датчиков. Средние коэффициенты корреляции превышают 0,97. Сравнение между измерениями с квадрокоптера на ББС и данными профилимера МТР-5НЕ показывает худшие результаты: среднее значение RMSD составляет  $\approx 1,3$  °C, а средний коэффициент корреляции равен 0,77. Но профилимер МТР-5 является устройством дистанционного зондирования и не может считаться эталоном. Тем не менее, данные контактных и дистанционных измерений хорошо согласуются по определению наличия инверсий и их высоты (рис. 2д, е).

Таблица 3

Статистические параметры сравнения (RMSD и коэффициенты корреляции R) между восходящими и нисходящими профилями температуры и влажности, построенными с использованием различных методов коррекции инерции: без коррекции; с коррекцией на основе значений  $\Delta t$ , определенной отдельно для каждого полета (C1); с коррекцией, основанной на средних значениях  $\Delta t$  (C2).

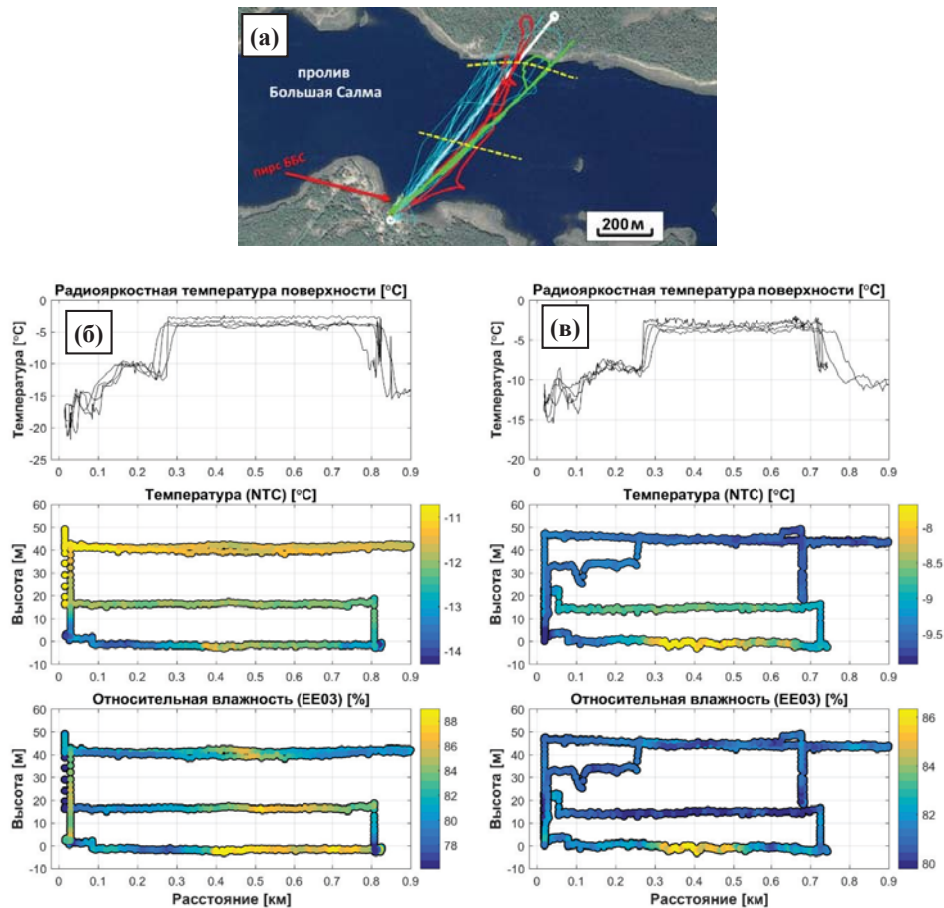
Компания и размещение датчиков	Коррекция	$T_{NTC}^{asc}$ vs $T_{NTC}^{dsc}$		$T_{EE03}^{asc}$ vs $T_{EE03}^{dsc}$		$RH_{EE03}^{asc}$ vs $RH_{EE03}^{dsc}$	
		RMSD [°C]	R	RMSD [°C]	R	RMSD [%]	R
ББС, датчики рядом	нет	0.98	0.72	0.92	0.78	5.61	0.60
	C1	0.51	0.90	0.31	0.97	3.75	0.74
	C2	0.53	0.87	0.34	0.95	3.56	0.65
ББС, датчики разнесены	нет	0.32	0.87	0.51	0.68	2.60	0.48
	C1	0.28	0.93	0.38	0.88	2.17	0.55
	C2	0.31	0.89	0.40	0.85	1.96	0.59
Обнинск, датчики разнесены	нет	0.25	0.98	0.36	0.99	2.56	0.97
	C1	0.23	0.98	0.18	0.99	0.88	0.98
	C2	0.25	0.98	0.19	0.99	0.83	0.97

### 2.3 Горизонтальные разрезы над незамерзающей полыньей

Арктические полыньи привлекают внимание благодаря их значительному вкладу в тепловой баланс приземного слоя атмосферы в зимних условиях (Burk et al. 1997, Ретина, Аниферов 2018). Ряд современных модельных исследований указывает на необходимость дополнительных натурных наблюдений конвективных пограничных слоев (КПС), которые формируются над полыньей (Esau 2007; Vihma et al. 2014). В нашем исследовании рассмотрен опыт использования квадрокоптера для исследования колебаний температуры и влажности внутри КПС, который формируется над незамерзающей полыньей в проливе Большая Салма. В ходе кампании на ББС было выполнено 6 полетов над полыньей. Каждый полет включал горизонтальные разрезы на высотах 5, 10-20 и 40-50 м. Маршрут и высота полета контролировалась вручную, поэтому траектории полетов несколько различаются. В дальнейшем анализе рассматриваются проекции траекторий полета на линию, идущую от пирса ББС через пролив (Рис. 3а). Поправки на инерцию применялись, как описано выше, с использованием средних значений  $\Delta t$ .

Предварительные результаты эксперимента по изучению КПС над полыньей показаны на примере двух случаев с более сильной (рис.3б) и более слабой (рис. 3в) температурной инверсией (рис. 2а и 2б). Данные измерений ИК температуры поверхности позволяют определить края полыньи (диаграммы 3б,с верхние панели). Температура открытой воды ( $\approx -3^\circ\text{C}$ ) немного ниже точки замерзания ( $-1.8^\circ\text{C}$ ), что может быть объяснено

наличием тонких ледяных пятен на воде. Температура поверхности значительно ниже для льда ( $\approx -10^{\circ}\text{C}$ ) и заснеженной суши (до  $-15^{\circ}\text{C}$ ). Неопределенность положения краев полыньи ( $\pm 25$  м) обусловлена различиями между траекториями полета квадрокоптера на разных высотах и различным наклоном квадрокоптера.



**Рис. 3.** Траектории всех полетов над полыньей, которые выполнялись на БС (а), где траектории двух рассмотренных полетов (б, в), показаны зеленым и красным цветом соответственно. Желтые пунктирные линии указывают на приблизительное положение краев полыньи. Для двух рассматриваемых полетов распределение ИК-температуры поверхности, температуры воздуха и относительной влажности отоброжено вдоль проекции на отрезок, показанный белой линией на схеме (а). Ноль на оси абсцисс - точка взлета вблизи пирса.

Все выполненные приповерхностные разрезы (на высотах порядка 5 м) указывают на повышение температуры воздуха до  $2^{\circ}\text{C}$  над полыньей. В двух рассмотренных случаях сплошная область повышения температуры наблюдается в средней части полыньи, ближе к ее южному краю. Но в других точках над полыньей наблюдается несколько обособленных областей повышения температуры, что свидетельствует о существовании различных режимов конвекции. Области повышения температуры совпадают с областями повышения влажности (рис. 3в, нижние панели). Горизонтальные разрезы выше 20 м показывают преимущественно однородное распределение температуры без каких-либо заметных возмущений над полыньей. То же самое касается влажности, за исключением одного случая,



показанного на рис. 3б. Для этого случая с сильной инверсией температуры увеличение влажности над полярной прослеживается даже на высоте 40 м.

Полученные результаты позволяют предположить, что над полярной развивается тонкий КПС. Его высота может быть очень грубо оценена в 20-40 м, что согласуется с толщиной облачного слоя, формирующегося над полярной в благоприятных условиях, с предыдущими оценками высоты КПС над той же самой полярной (Степаненко и др. 2011) и с модельными исследованиями, которые предполагают высоту КПС около 50-100 м для полярной шириной  $\approx 1$  км (Esau 2007; Vihma et al. 2014).

### 3. Заключение и выводы

Проведенное исследование показало, что даже относительно недорогой, «массовый» квадрокоптер может быть полезным инструментом для метеорологических измерений в АПС. Квадрокоптер модели DJI Phantom 4 Pro, оснащенный метеорологическими датчиками iMet-XF, успешно использован для различных типов измерений во время зимней исследовательской кампании на севере России. Сравнение между измерениями, выполненными с использованием квадрокоптера, и эталонными наблюдениями (температурный профилимер МТР-5НЕ на БС и высотная метеорологическая мачта ВММ-310 в Обнинске) подтвердило, что квадрокоптер можно успешно использовать для получения вертикальных профилей температуры и влажности. Более того, использование квадрокоптера позволяет диагностировать особенности вертикального строения атмосферы, не разрешаемые методами дистанционного зондирования. Особую перспективность использованию БПЛА такого типа придает возможность восстановления данных о скорости и направлении ветра по данным наклоне летательного аппарата, регистрируемых бортовым компьютером (Neumann, Bartholmai, 2015). Эта возможность будет проверена в наших дальнейших исследованиях.

Горизонтальные разрезы над незамерзающей полярной показали возможность проведения контактных измерений метеорологических характеристик над труднодоступными областями и позволили изучить влияние полярной на температуру и влажность приземного слоя атмосферы. Такой опыт открывает широкие возможности для новых экспериментальных кампаний, которые могли бы улучшить общее понимание атмосферных процессов над неоднородными ландшафтами, такими как лесные озера (Barskovet al. 2017), полярной (Burket al. 1997; Esau, 2007) и урбанизированные территории, включая мегаполисы (Варенцов и др., 2017; Локощенко и др., 2016; Chow, Ho, 2016) и арктические города, где недавно были обнаружены характерные городские острова тепла, ярко выраженные в зимних условиях (Konstantinovet al. 2018).

При этом использование квадрокоптеров для мониторинга характеристик АПС требует аккуратной обработки данных и учета ряда особенностей измеряемых величин. В том числе, требуется коррекция инерции датчиков. Инерция может быть значительно уменьшена с помощью датчиков с меньшим временем отклика (например, НТС термистор в нашем исследовании). Однако неправильное расположение таких датчиков может свести положительный эффект от их использования к минимуму, как произошло в случае установки двух датчиков слишком близко друг к другу (рис. 1б). Простая коррекция инерции, основанная на сдвиге временных рядов, значительно улучшает согласование между восходящими и нисходящими вертикальными профилями температуры и влажности. Но этот способ может быть неэффективным в случае особенно резких температурных градиентов, как показано на рис. 3б. Поэтому существует необходимость в более детальном теоретическом понимании погрешности измерений, выполняемых на базе квадрокоптера, и в разработке более сложных методов коррекции, подобных предложенным ранее для беспилотных самолетов (Jacobi et al. 1995).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-РГО №17-05-41095. Экспериментальные работы на БС МГУ проводились за счет гранта РНФ №17-17-01210. Анализ технических особенностей квадрокоптера выполнен за счет гранта РНФ 18-77-10072.

Авторы глубоко благодарны руководству и сотрудникам ФГБУ «НПО «Тайфун» и лично Кулижниковой Л.К. за предоставление использовавшихся в исследовании данных наблюдений высотной метеорологической мачты в г. Обнинск.

#### Литература

1. *Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И.* Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 6. С. 25–37.
2. *Воскресенский И.С., Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М., Энтин А.Л., Иванов М.М.* Изучение морфологии оползня на основе данных ГНСС и воздушного зондирования (на примере участка долины р. Протва) // Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 5–6. С. 50–57.
3. *Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С.* Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2016. Т. 32. № 4. С. 34–46.
4. *Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В., Дубовецкий А.З., Новицкий М.А., Разин П.Е.* О Высотной Протяженности Городского “Острова Тепла” Над Москвой // Доклады Академии Наук. 2016. Т. 466. № 2. С. 213–217.
5. *Новицкий М.А., Мазурин Н.Ф., Кулижникова Л.К., Калининчева О.Ю., Терев Л.А., Нечаев Д.Р., Сапронов В.Л.* Сравнение данных измерений ветра при помощи выпускаемого промышленного содара и высотной метеорологической мачты в Обнинске // Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С. 74–83.
6. *Репина И.А., Аниферов А.А.* Исследование динамики атмосферного пограничного слоя над заприпайной полынью моря Лаптевых по данным WRF-моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 275–288.
7. *Степаненко В.М., Дебольский А.В., Варенцов М.И., Кузнецов Д.Е., Зимин М.И.* Изучение атмосферной конвекции над арктической полынью с применением суперкомпьютерных вычислений и спутниковых данных высокого разрешения // Земля из космоса наиболее эффективные решения. 2011. № 10. С. 52–55.
8. *Эзау И.Н., Вольф Т., Миллер Е.А., Репина И.А., Троицкая Ю.И., Зилитинкевич С.С.* Анализ результатов дистанционного мониторинга профиля температуры в нижних слоях атмосферы долины г. Берген (Норвегия) // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 93–103.
9. *Ajayi O.G., Salubi A.A., Angbas A.F., Odigire M.G.* Generation of accurate digital elevation models from UAV acquired low percentage overlapping images // Int. J. Remote Sens. 2017. V. 38. № 8–10. P. 3113–3134.
10. *Barskov K.V., Chernyshev R.V., Stepanenko V.M., Repina I.A., Artamonov A.Y., Guseva S.P., Gavrikov A.V.* Experimental study of heat and momentum exchange between a forest lake and the atmosphere in winter // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2017. V. 96. № 1. P. 12003.
11. *Beyrich F.* Mixing height estimation from sodar data — A critical discussion // Atmos. Environ. 1997. V. 31. № 23. P. 3941–3953.
12. *Boer G., Ivey M., Schmid B., Lawrence D., Dexheimer D., Mei F., Hubbe J., Bendure A., Hardesty J., Shupe M.D., McComiskey A., Telg H., Schmitt C., Matrosov S.Y., Brooks I., Creamean J., Solomon A., Turner D.D., Williams C., Maahn M., Argrow B., Palo S., Long C.N., Gao R.S., Mather J.* A bird’s-eye view: Development of an operational ARM unmanned aerial capability for atmospheric research in arctic Alaska // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2018. V. 99. № 6. P. 1197–1212.
13. *Burk S.D., Fett R.W., Englebretson R.E.* Numerical simulation of cloud plumes emanating from Arctic leads // J. Geophys. Res. Atmos. 1997. V. 102. № D14. P. 16529–16544.
14. *Chow W., Ho D.* Investigating the vertical dimension of Singapore’s urban heat island through quadcopter platforms: an pilot study // Geophysical Research Abstracts. 2016. V. 5690.
15. *Cimoli E., Marcer M., Vandecrux B., Bøggild C.E., Williams G., Simonsen S.B.* Application of Low-Cost UASs and Digital Photogrammetry for High-Resolution Snow Depth Mapping in the Arctic // Remote Sens. 2017. V. 9. № 11. P. 1144.
16. *DeMario A., Lopez P., Plewka E., Wix R., Xia H., Zamora E., Gessler D., Yalin A.* Water Plume Temperature Measurements by an Unmanned Aerial System (UAS) // Sensors. 2017. V. 17. № 2. P. 306.
17. *Esau I.N.* Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: Large-eddy simulation study // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № D8. P. D08109.

18. *Ivanov A., Katz A., Kurnosenko S., Nash N., Zaitseva N.* WMO International Radiosonde Comparison, Phase 3, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 40. 1991. P. 172.
19. *Jacobi C., Scherf A., Siemer A.H., Roth R.* On the influence of sensor inertia on the estimation of turbulent fluxes from aircraft measurements // *Boundary-Layer Meteorol.* 1995. V. 76. № 1–2. P. 97–108.
20. *Jonassen M.O., Tisler P., Altstädter B., Scholtz A., Vihma T., Lampert A., König-Langlo G., Lüpkes C.* Application of remotely piloted aircraft systems in observing the atmospheric boundary layer over Antarctic sea ice in winter // *Polar Res.* 2015. V. 34. P. 1–15.
21. *Kadygrov E.N., Pick D.R.* The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons within situ observations // *Meteorol. Appl.* 1998. V. 5. № 4. P. 393–404.
22. *Konstantinov P., Varentsov M., Esau I.* A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. № 7. P. 75007.
23. *Kral S., Reuder J., Vihma T., Suomi I., O'Connor E., Kouznetsov R., Wrenger B., Rautenberg A., Urbancic G., Jonassen M., Båserud L., Maronga B., Mayer S., Lorenz T., Holtslag A., Steeneveld G.-J., Seidl A., Müller M., Lindenberg C., Langohr C., Voss H., Bange J., Hundhausen M., Hilsheimer P., Schygulla M.* Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR) — The Hailuoto 2017 Campaign // *Atmosphere.* 2018. V. 9. № 7. P. 268.
24. *Lang S., McKeogh E.* LIDAR and SODAR measurements of wind speed and direction in upland terrain for wind energy purposes // *Remote Sens.* 2011. V. 3. № 9. P. 1871–1901.
25. *Li F., Yang W., Liu X., Sun G., Liu J.* Using high-resolution UAV-borne thermal infrared imagery to detect coal fires in Majiliang mine, Datong coalfield, Northern China // *Remote Sens. Lett.* 2018. V. 9. № 1. P. 71–80.
26. *Neumann P.P., Bartholmai M.* Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit // *Sensors Actuators, A Phys.* 2015. V. 235. P. 300–310.
27. *Nishar A., Richards S., Breen D., Robertson J., Breen B.* Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei - Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand // *Renew. Energy.* 2016. V. 86. P. 1256–1264.
28. *Patel P.N., Patel M.A., Faldu R.M., Dave Y.R.* Quadcopter for Agricultural Surveillance // *Adv. Electron. Electr. Eng.* 2013. V. 3. № 4. P. 427–432.
29. *Roldán J.J., Joossen G., Sanz D., Cerro J. del, Barrientos A.* Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses // *Sensors (Switzerland).* 2015. V. 15. № 2. P. 3334–3350.
30. *Spiess T., Bange J., Buschmann M., Vörsmann P.* First application of the meteorological Mini-UAV «M2AV» // *Meteorol. Zeitschrift.* 2007. V. 16. № 2. P. 159–169.
31. *Vihma T., Pirazzini R., Fer I., Renfrew I.A., Sedlar J., Tjernström M., Lüpkes C., Nygård T., Notz D., Weiss J., Marsan D., Cheng B., Birnbaum G., Gerland S., Chechin D., Gascard J.C.* Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: A review // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. № 17. P. 9403–9450.
32. *Wildmann N., Bernard S., Bange J.* Measuring the local wind field at an escarpment using small remotely-piloted aircraft // *Renew. Energy.* 2017. V. 103. P. 613–619.