DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-20-39

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

И.А. Репина, гл. науч. сотр. Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, вед. спец. Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова и Московского центра фундаментальной и прикладной математики, д-р физ.-мат. наук, проф., *repina@ifaran.ru*
М.И. Варенцов, науч. сотр. Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова, Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Московского центра фундаментальной и прикладной математики, канд. геогр. наук, *mvar91@gmail.com*
Д.Г. Чечин, вед. научн. сотр. Московского физико-технического института и Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, канд. физ.-мат. наук, *chechin@ifaran.ru*
А.Ю. Артамонов, мл. науч. сотр. Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, *sailer@ifaran.ru*
Н.Е. Бодунков, доцент Московского авиационного института, канд. техн. наук, *boduncov63@hotmail.com*
М.Ю. Калягин, ведущий инженер Московского авиационного института, *mukalyagin@yandex.ru*
Д.Н. Живоглотов, науч. сотр. Центральной аэрологической обсерватории, канд. техн. наук, *dimazhiv@rambler.ru*
А.М. Шевченко, ст. науч. сотр. Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, канд. физ.-мат. наук, *shevch@itam.nsc.ru*
А.И. Варенцов, магистрант географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, *jdeadfox17@gmail.com*
Н.Е. Куксова, магистрант географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, *kuksova_97@mail.ru*
В.М. Степаненко, зам. дир. Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ имени М.В. Ломоносова и Московского центра фундаментальной и прикладной математики, д-р физ.-мат. наук, *vstepanenkomeister@gmail.com*
А.А. Шестакова, науч. сотр. Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, канд. геогр. наук, *shestakova.aa.92@gmail.com*

Рецензент: И.Н. Якутов

Статья посвящена различным аспектам использования беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя. Рассмотрены характеристики атмосферного пограничного слоя, измеряемые с помощью беспилотных летательных аппаратов. Представлены типы используемых аппаратов и измерительных систем. Даны характеристики измерительных систем на базе беспилотных летательных аппаратов самолетного и коптерного типов, разрабатываемых в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, и краткий обзор ряда измерительных кампаний. Рассмотрены перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в метеорологии и физике атмосферы.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, атмосферный пограничный слой, профили метеовеличин, атмосферная турбулентность, атмосферное зондирование, метеорология, физика атмосферы, микроклимат, инверсия температуры.

APPLICATION OF UNMANNED AIRCRAFT FOR STUDYING OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

I.A. Repina, Chief Researcher, Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, Research Computing Centre of Moscow State University named after M.V. Lomonosov and the Moscow Centre for Fundamental and Applied Mathematics, Ph. D., Professor, *Repina@ifaran.ru*
M.I. Varentsov, Researcher, Research Computing Centre of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS and Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Doctor of Geography, *mvar91@gmail.com*
D.G. Chechin, Leading Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology and Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, Doctor of Physics and Mathematics, *chechin@ifaran.ru*
A.Yu. Artamonov, Junior Researcher, Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, *sailer@ifaran.ru*
N.E. Bodunkov, Assistant Professor, Moscow Aviation Institute, Doctor of Engineering, *boduncov63@hotmail.com*
M.Yu. Kalyagin, Leading Engineer Moscow Aviation Institute, *mukalyagin@yandex.ru*
D.N. Zhivoglotov, Researcher, Central Aerological Observatory, Doctor of Engineering, *dimazhiv@rambler.ru*
A.M. Shevchenko, Senior Researcher, Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich, SB RAS, Doctor of Physics and Mathematics, *shevch@itam.nsc.ru*
A.I. Varentsov, Undergraduate Student, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, *jdeadfox17@gmail.com*
N.E. Kuksova, Undergraduate Student, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, *kuksova_97@mail.ru*
V.M. Stepanenko, Deputy Director Research Computing Centre of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, and Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Ph. D., *vstepanenkomeister@gmail.com*
A.A. Shestakova, Researcher, Institute of Atmospheric Physics named after A.M. Obukhov, RAS, Doctor of Geography, *shestakova.aa.92@gmail.com*

The article is devoted to various aspects of the use of unmanned aerial vehicles (UAV) for the study of the atmospheric boundary layer. The characteristics of the atmospheric boundary layer, measured using the UAV, are considered. The types of devices and measuring systems used are presented. The characteristics of measuring systems installed on a fixed-wing aircraft and copter UAVs developed in the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS (IAP RAS) are presented. A brief overview of a number of the IAP RAS measurement campaigns is given. The prospects of using UAV in meteorology and atmospheric physics are considered.

Keywords: unmanned aerial vehicles, atmospheric boundary layer, profiles of meteorological parameters, atmospheric turbulence, atmospheric physics, meteorology, atmospheric sounding, temperature inversions.

Введение

Информация о вертикальной структуре тропосферы и ее временной изменчивости на разных высотах важна для ряда задач – от безопасности авиационных полетов до прогноза опасных метеорологических явлений и разработки теорий физики атмосферного погранич-

ного слоя. При этом вертикальные профили метеорологических величин сильно изменчивы по времени при различных метеорологических явлениях, таких как шквалы, атмосферные фронты, интенсивные циркуляции в мезомасштабных конвективных системах. В результате многочисленных исследований были получены эмпирические обобщенные вертикальные профили подобия для метеорологических параметров в атмосферном пограничном слое и сглаживающие их функции [1], что позволило существенно продвинуться в понимании процессов в пограничном слое атмосферы и решить ряд прикладных задач. Но вопрос о структуре и динамике атмосферного пограничного слоя при условиях сильно устойчивой и неустойчивой стратификаций, при наличии атмосферных температурных инверсий, и особенно в условиях неоднородной поверхности, остается открытым. Это касается прибрежных и горных рельефов, ледовитых морей, городских ландшафтов, лесных территорий с неоднородной растительностью. Информация о профилях скорости ветра, температуры и влажности является важным сопровождением полевых исследований газового и аэрозольного состава атмосферы и неотъемлемой частью подспутниковых экспериментов, а также критически необходима для верификации и совершенствования численных моделей погоды и климата.

Стандартный способ измерения профилей метеопараметров в атмосфере – радиозондирование с использованием шаров [2, 3]. Недостатки этого метода – дороговизна (зонды являются приборами одноразового использования) и, как следствие, разреженность сети аэрологических наблюдений и низкое временное разрешение: на большинстве аэрологических станций зондирование производится в лучшем случае 2 раза в сутки. Для мониторинга состояния атмосферы используются многоуровневые контактные измерения на метеорологических мачтах различной высоты [4–8]. Но эти измерения имеют дискретный характер и охватывают лишь приземный слой высотой максимум несколько сотен метров. Кроме того, необходима точная взаимная калибровка используемых метеорологических датчиков. Перспективным решением задачи мониторинга вертикальной структуры атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением является дистанционное зондирование (содары, лидары, радары, температурные и влажностные профилемеры) [9–14]. Но все дистанционные методы зондирования основаны на регистрации излучения в различных диапазонах длин волн и при восстановлении профилей приводят к ряду ограничений, а используемая аппаратура дорога и громоздка. Наиболее полную информацию о строении пограничного слоя атмосферы дают самолеты-лаборатории [15–18]. Но эти измерения – дорогостоящие, и далеко не всегда есть возможность проводить их в исследуемых условиях.

Новые возможности для метеорологических измерений в атмосферном пограничном слое открывает использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Существуют два основных типа БПЛА: самолеты и многороторные вертолеты (обычно создаваемые по схеме квадрокоптера или октокоптера, далее – мультикоптеры). Первые попытки использовать БПЛА для исследования атмосферных процессов были предприняты еще в 70-е гг. XX в. [19]. Дальнейшие развитие компьютерных технологий, уменьшение размера датчиков и другие технологические достижения вывели беспилотные самолеты «на передовую» экспериментальных метеорологических исследований [8, 20–25]. БПЛА разных типов представляют собой многообещающий инструмент для атмосферных измерений, а именно: для исследований вертикального или горизонтального распределения температуры, влажности, ветра, характеристик турбулентности и т. д.

Беспилотные летательные аппараты самолетного типа

В последнее десятилетие началось активное использование беспилотных летательных аппаратов самолетного типа (БПЛА СТ) в метеорологических исследованиях [7, 8, 20, 24, 26], в том числе в целях измерения температуры, влажности и скорости ветра на различных высотах. Такое применение особенно актуально в труднодоступных районах с разреженной сетью метеорологических и аэрологических наблюдений. Измерения вертикальных профилей метеовеличин с помощью БПЛА СТ проводились над морским льдом у побережья

Антарктиды [7, 27], а также над морским льдом в Ботническом заливе [8]. Это позволило получить данные об эволюции атмосферного пограничного слоя с высоким пространственно-временным разрешением. Для измерения профилей на БПЛА СТ используются датчики температуры, влажности и давления, аналогичные применяемым в радиозондах, но, в отличие от радиозондирования, датчики могут использоваться многократно. Средняя скорость ветра на различных высотах определяется по измерениям воздушной скорости с помощью обыкновенной трубки Пито и по измерениям скорости БПЛА СТ относительно Земли. Последняя определяется по данным приемника спутниковой навигационной системы, установленного на БПЛА СТ и являющегося частью системы автопилота. Такой способ измерения ветра возможен при подъеме/спуске БПЛА СТ по спирали или при совершении маневра типа «коробка». Пример такого БПЛА СТ с относительно недорогим комплексом полезной нагрузки – Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO) [28], применявшийся для исследований пограничного слоя во многих полевых экспериментах.

Наиболее актуально применение БПЛА СТ для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя, в особенности над неоднородной подстилающей поверхностью. Для таких задач БПЛА СТ имеют существенные преимущества перед традиционными стационарными наблюдениями с помощью акустических анемометров, устанавливаемых на мачте. Для измерений турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра, температуры и влажности необходимо оснащение измерительного комплекса на борту БПЛА СТ малоинерционными датчиками. Соответствующие измерительные комплексы применяются на пилотируемых самолетах-лабораториях [29, 30]. Из-за ограничений по весу полезной нагрузки для использования на БПЛА необходима разработка легких малогабаритных аналогов этих измерительных комплексов.

Для высокочастотных измерений температуры воздуха наиболее часто применяются термометры сопротивления, чувствительным элементом которых является платиновая нить. Благодаря небольшой воздушной скорости БПЛА платиновая нить может быть непосредственно вынесена в воздушный поток, что уменьшает постоянную времени датчика [31]. Также на БПЛА применяются миниатюрные термопары, которые, как правило, имеют несколько бóльшую постоянную времени, чем платиновые термометры сопротивления. Кроме того, для измерения пульсаций температуры нашли применение малоинерционные оптоволоконные датчики [32].

Малоинерционные измерения пульсаций влажности осуществляются с помощью оптических приборов, принцип измерения влажности в которых основан на поглощении оптического излучения молекулами водяного пара. К сожалению, такие приборы имеют сравнительно большие габариты и вес. Так, существуют примеры использования криптонового гигрометра KH20 производства Campbell Scientific на крупных БПЛА СТ. В облегченном корпусе гигрометр KH20 был установлен на беспилотный самолет Manta [33] и на беспилотный самолет Latitude Engineering HQ-60 [32]. Эти самолеты имеют вес 30–40 кг и могут нести до 5 кг полезной нагрузки. Среди миниатюрных и недорогих датчиков, установка которых возможна на БПЛА СТ с небольшой взлетной массой, наименьшую постоянную времени, насколько известно авторам, имеет емкостной датчик влажности P14 Rapid производства Innovative Sensor Technology (IST), время отклика которого составляет менее 1,5 с. Следующее поколение датчика IST P14 – Rapid 2 – имеет еще меньшую постоянную времени: примерно 0,5 с [URL: https://www.ist-ag.com/en/news-events/news/smallest-humidity-sensor-ultra-fast-response-time-0 (дата обращения: 10.10.2020)]. Исходя из представлений о характерных масштабах турбулентных вихрей в пограничном слое, можно ожидать, что датчик влажности с постоянной времени менее 1,0 с позволит регистрировать пульсации влажности, связанные с наиболее крупными энергонесущими турбулентными вихрями.

Пульсации трех компонент скорости ветра восстанавливаются по измерениям модуля и направления воздушной скорости, а именно: углов атаки и скольжения, скорости и ориен-

тации (углы крена, тангажа и рысканья) самолета относительно Земли. Наиболее распространенный метод измерения модуля воздушной скорости и углов атаки и скольжения – использование многоканального приемника воздушных давлений (МПВД), устанавливаемого на выносе на носу самолета в невозмущенном потоке. Наибольшее распространение получили пятиточечные приемники воздушных давлений. Скорость и углы ориентации самолета относительно Земли измеряются с помощью инерциальной навигационной системы, измерения которой совмещаются с измерениями приемника спутниковой навигационной системы с использованием фильтра Калмана. Системы, совмещающие миниатюрный МПВД и инерциальную навигационную систему и подходящие для установки на БПЛА, предлагаются различными производителями, например Aeroprobe [URL: http://www.aeroprobe.com/air-data-probe (дата обращения: 10.10.2020)] или Aventech [URL: https://aventech.com/products/arim310.html (дата обращения: 09.10.2020)].

БПЛА СТ с комплексом полезной нагрузки, аналогичным описанному выше, применялся для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя во время перехода от ночного устойчивого пограничного слоя к дневному конвективному [34], а также для измерений трехмерного поля ветра и турбулентной кинетической энергии в районе проектируемого расположения ветроэнергетических установок [24], для расчета турбулентных потоков тепла и влаги над сушей и морской поверхностью [33].

В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН совместно с Московским авиационным институтом был разработан БПЛА самолетного типа «Цимлянин» с вертикальным и взлетом/посадкой для исследования средней и турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя (рис. 1). Основное назначение разработанного БПЛА – измерение турбулентных статистик трех компонент скорости ветра и температуры на различных высотах в пределах пограничного слоя, а также над неоднородной подстилающей поверхностью. Особый интерес представляет применение БПЛА для исследования перестройки турбулентности над резкими границами термических и динамических свойств подстилающей поверхности, такими как суша – вода, лес – поле, лед – вода и др.

Рис 1. Беспилотный летательный аппарат «Цимлянин» с вертикальными взлетом/посадкой с комплексом полезной нагрузки

Особенность разработанного БПЛА – возможность вертикальных взлета/посадки, которые происходят в так называемом коптерном режиме за счет работы четырех подъемных винтов. Во время полета в самолетном режиме работает только толкающий винт, а подъемные винты не вращаются и не создают возмущений потока в области расположения датчиков. Преимущество такой «гибридной» схемы заключается прежде всего в более мягком и контролируемом режиме взлета/посадки, что снижает вероятность повреждения полезной нагрузки. Размах крыла БПЛА составляет 2,4 м, взлетный вес – 8–9 кг, крейсерская скорость – 15–20 м/с, масса полезной нагрузки – до 1,5 кг, максимальная продолжительность полета – свыше 60 мин., рабочий диапазон высот – до 1,5 км. БПЛА оборудован автопилотом Pixhawk 4 и может выполнять полет по заранее заданному маршруту.

Блок полезной нагрузки включает:

– семиточечный приемник воздушных давлений, разработанный совместно с Институтом теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск);

– инерциальную навигационную систему Ellipse 2N производства SBG Systems;

– малоинерционный платиновый термометр сопротивления, изготовленный в сотрудничестве с Центральной аэрологической обсерваторией (г. Долгопрудный);

– датчик температуры и влажности Vaisala HMP110;

– емкостной датчик влажности IST P14 Rapid;

– ИК-датчик температуры подстилающей поверхности производства Melexis.

В основе системы опроса датчиков и регистрации показаний лежит использование одноплатного компьютера Raspberry Pi.

Тестовые полеты БПЛА «Цимлянин» и апробация комплекса полезной нагрузки в натурных условиях были проведены во время полевого эксперимента ИФА им. А.М. Обухова РАН на базе Цимлянской научной станции в период 06–14.08.2020. Выбор времени и места тестовых полетов был обусловлен возможностью сравнения наблюдений с традиционными измерениями атмосферной турбулентности с использованием акустических анемометров, установленных на мачте на высотах 2; 10 и 30 м, а также с данными двух акустических локаторов – содаров, установленных вблизи мачты.

За время эксперимента было проведено 10 полетов, во время которых проверялась работоспособность различных элементов комплекса полезной нагрузки и уточнялись летные характеристики БПЛА. В результате полетов было продемонстрировано соответствие летных характеристик БПЛА расчетным. Первичный анализ данных измерений, полученных с помощью комплекса полезной нагрузки, продемонстрировал работоспособность системы и корректное функционирование всех датчиков и узлов системы опроса и регистрации.

На рис. 2а приведены вертикальные профили температуры воздуха, полученные по измерениям датчика Vaisala HMP110 и платинового термометра сопротивления во время подъема БПЛА «Цимлянин» по спирали. Траектория подъема до высоты 380 м показана на рис. 2б. Измерения проводились в хорошо перемешанном конвективном пограничном слое при достаточно сильном ветре, скорость которого составляла примерно 8 м/с на высоте 30 м. Видно, что измеренные профили близки к сухой адиабате, которая, как известно, наблюдается в средней части перемешанного пограничного слоя. Показания платиновой нити ближе к измерениям на высоте 2 и 10 м, полученным с помощью градиентной метеостанции Aanderaa. Различия между показаниями датчиков могут быть связаны с точностью калибровки, различной постоянной времени и различным коэффициентом восстановления температуры. Скачки на графике температуры связаны с режимом полета БПЛА. Из-за сильного ветра и большого радиуса кривизны поворота во время подъема по спирали воздушная скорость БПЛА менялась от 15 до 30 м/с, причем вираж с подветренной стороны спирали сопровождался потерей высоты. Изменение воздушной скорости (а также, возможно, углов атаки и скольжения) сказалось также и на показаниях температуры. Очевидно, что для

более надежного измерения профиля температуры необходимы задание большего радиуса окружности (радиус равен 125 м, см. рис. 2а), вокруг которой производится подъем по спирали, а также лабораторное определение зависимости коэффициента восстановления температуры от воздушной скорости и углов атаки и скольжения.

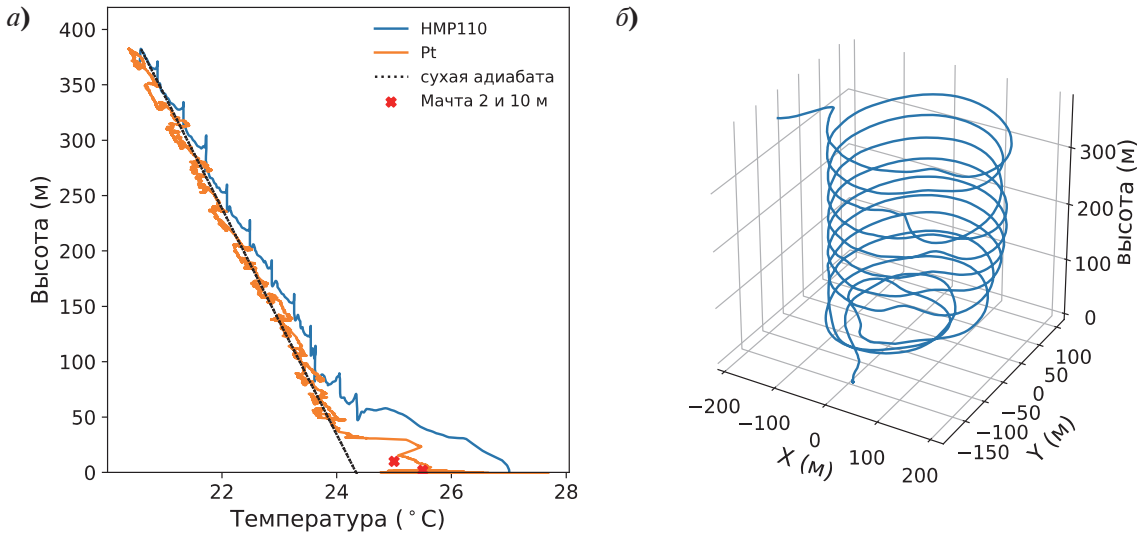


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воздуха по данным измерений БПЛА «Цимлянин» с помощью платиновой нити (оранжевая кривая) и датчика HMP110 Vaisala (синяя кривая), красными символами «*x*» показаны измерения температуры на 2 и 10 м, полученные с помощью метеостанции Aanderaa (*а*); траектория полета БПЛА «Цимлянин» (*б*)

Беспилотные летательные аппараты мультикоптерного типа

Мультироторные беспилотные летательные аппараты, или мультикоптеры, стали активно развиваться значительно позже БПЛА самолетного типа, но в настоящее время являются более массовыми и популярными устройствами, нашедшими применение при решении самых разных задач. Их ключевые преимущества – простота управления, маневренность, возможность взлетать и садиться в условиях ограниченного пространства, зависать или двигаться вертикально над заданной точкой. Недостатки мультикоптеров – относительно малое время полета (обычно не более 30 мин. на одной батарее) и соответствующие ограничения по дальности и высоте полета.

Последние разработки в области программного и аппаратного обеспечения для мультикоптеров позволили значительно повысить надежность и удобство их использования. Современные мультикоптеры стали массовыми устройствами, которыми могут легко управлять пользователи без специальных навыков пилотирования. В настоящее время мультикоптеры широко используются в различных целях, включая фото- и видеосъемку, картографию и различные задачи мониторинга. Они используются в исследовании сельскохозяйственных угодий [35, 36], лесных ландшафтов [37], для создания цифровых моделей рельефа высокого разрешения [38, 39], для оценок глубины снега [40] и для мониторинга и картирования температуры поверхности Земли и водных объектов с использованием инфракрасных фотокамер и радиометров [35, 41–43]. Растет и число исследований, посвященных применению мультироторных БПЛА для атмосферных исследований. Показана перспективность их применения в полевых экспериментальных кампаниях для мониторинга вертикальной структуры пограничного слоя атмосферы, в том числе в суровых условиях Арктики и Антарктики [7, 8, 23, 25, 44].

Важное преимущество мультикоптеров для метеорологических измерений – возможность получения оценки скорости ветра без использования дополнительных внешних датчиков, только лишь по данным полетного контроллера. Получение такой оценки скорости и направления ветра возможно благодаря особенностям принципов движения квадрокоптера. Движение квадрокоптера в горизонтальном направлении осуществляется с помощью перераспределения мощности двигателей для изменения крена и тангажа воздушного судна и, соответственно, отклонения вектора тяги в нужную сторону. Используя данные навигационной системы – GPS-приемника, компаса, гироскопов и акселерометров, бортовой компьютер обеспечивает удержание заданной пилотом точки или скорости относительно Земли, компенсируя при этом влияние ветра. Соответственно, скорость и направление ветра могут быть восстановлены по показаниям датчиков навигационной системы БПЛА [45, 46].

В большинстве работ по применению мультикоптеров для атмосферных исследований используются БПЛА, не произведенные промышленно, а собранные из отдельных компонент. Это могут быть как достаточно простые модели, собранные из стандартных комплектующих, на которые прикреплены метеорологические датчики, так и более сложные системы, разработанные с учетом специфики задачи проведения атмосферных измерений. Например, научной группой из университета Оклахомы (США) разработана модель CopterSonde для задач вертикального зондирования нижней атмосферы [47]. Датчики температуры и влажности расположены в специальном отсеке корпуса, где обеспечиваются их затенение и аспирация (обдув) с постоянной скоростью, а система сбора данных с датчиков интегрирована с полетным контроллером и автопилотом. Это позволяет дрону автоматически замедлять скорость при увеличении вертикального градиента температуры, чтобы получить более аккуратные измерения в зоне резких градиентов, а также держать курс в зависимости от направления ветра. Другой пример подобной разработки – модель MeteoDrone, разрабатываемая и выпускаемая швейцарской компанией MeteoMatics (рис. 3).

а) *б*)

Рис. 3. Фотографии моделей MeteoDrone (*а*) и CopterSonde (*б*), разработанных для атмосферных измерений в Швейцарии и США

Источники: https://www.meteomatics.com; [47]

Использование специализированных решений требует либо существенных трудозатрат на разработку подобной системы, либо крупных финансовых затрат на приобретение коммерческого продукта. Так, стоимость модели MeteoDrone составляет десятки тысяч евро. Альтернативный вариант – более простые и недорогие системы измерений, созданные на базе коммерческих мультикоптеров массового производства. Одна из групп, развивающих

технологии применения подобных средств измерений в России, – коллектив ученых из Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова. С 2017 г. эта группа работает над развитием методики метеорологических измерений в пограничном слое атмосферы с использованием относительно недорогих коммерческих квадрокоптеров DJI Phantom 4 и датчиков производства американской компании International Met Systems. За последние годы научной группой получен большой опыт применения таких квадрокоптеров для атмосферных измерений в различных условиях и для различных научных задач.

Квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro – популярная модель, предназначенная для фото/видеосъемки. Она имеет относительно невысокую стоимость и хорошие летные качества, а также проста в управлении. Максимальная высота полета составляет 500 м, горизонтальный диапазон ограничен 1–2 км, время полета на одной батарее составляет около 25 минут. Для измерения метеорологических параметров эти квадрокоптеры были оборудованы метеорологическими датчиками производства американской кампании International Met Systems [URL: http://www.intermetsystems.com (дата обращения: 10.10.2020)] – iMet-XF и iMet-XQ2. Модульная измерительная система iMet-XF включает центральную плату с датчиком атмосферного давления и набор внешних датчиков – датчик температуры и влажности воздуха EE03, термистор NTC (Negative Temperature Coefficient), инфракрасный датчик яркостной температуры поверхности и приемник GPS. Основные компоненты системы (центральная плата, устройство записи данных и элемент питания) смонтированы в пластиковом боксе, установленном на шасси квадрокоптера, внешние датчики температуры и влажности установлены на пластиковом выносе под правым передним пропеллером. Система iMet-XQ2 – устройство, включающее датчики атмосферного давления, температуры, влажности, GPS-приемник, устройство записи данных и элемент питания, собранные в компактном корпусе. Опыт применения этих систем показал, что наиболее удобный способ их установки – на шасси квадрокоптера, с выносом датчиков под передний пропеллер для их наилучшей аспирации (рис. 4). Для восстановления скорости ветра используются записи полетного контроллера квадрокоптера (flight logs), доступные для скачивания через ПО DJI Assistant и конвертации в текстовый формат в ПО CsvView [URL: http://datfile.net/CsvView/downloads.html (дата обращения: 10.10.2020)]. Для обработки и анализа данных измерений разработан пакет программ, описанный более подробно в публикациях [23, 25].

Рис. 4. Фотография квадрокоптеров, оборудованных измерительными системами iMet-XF и iMet-XQ2. Фото А.И. Варенцова

Оснащенные таким образом измерительные системы могут быть использованы для решения широкого ряда научных задач. Первая, наиболее очевидная задача – получение вертикальных профилей метеорологических величин в нижней тропосфере. Квадрокоптер, оборудованный метеорологическим датчиками, позволяет получать синхронно измеренные, т. е. согласованные друг с другом, вертикальные профили температуры, влажности, скорости и направления ветра.

На рис. 5 показан пример вертикальных профилей температуры, влажности, скорости и направления ветра, измеренных с использованием квадрокоптера в береговой зоне Белого моря (п-ов Киндо, Беломорская биологическая станция МГУ) в зимний период, когда в условиях ясной погоды сформировалась мощная температурная инверсия в нижнем 350-метровом слое. Температурную инверсию также зафиксировал микроволновый радиометр для дистанционного зондирования профиля температуры – профилемер МТП-5 [14]. Но измерения с использованием квадрокоптера позволили получить представление о сложной неоднородной структуре вертикальных профилей других метеорологических величин, в том числе об усилении скорости ветра над слоем максимальных градиентов температуры и о резком повороте ветра в нижнем 100-метровом слое.

Естественно, возникает вопрос о точности и надежности данных, получаемых с использованием измерений на базе квадрокоптеров, а также о погрешностях, связанных с создаваемыми винтами квадрокоптера возмущениями атмосферы. Для верификации методики вертикального зондирования авторами проведена большая серия экспериментов, в том числе сравнение с данными высотной метеорологической мачты в Обнинске, с различными видами данных дистанционного зондирования и с данными высокочастотных измерений акустических анемометров. Все эти эксперименты показали, что результаты измерений с использованием квадрокоптеров объективно отражают реальные условия. Это демонстрируют примеры сравнения измерений с использованием квадрокоптера по температуре с данными высотной метеорологической мачты в Обнинске (рис. 6а) и с данными профилемера МТП-5 (см. рис. 6б) для условий неустойчивой стратификации атмосферы весной и летом соответственно. При этом для условий устойчивой стратификации с интенсивными приземными инверсиями метод измерений с использованием квадрокоптера оказывается во многом выигрышнее методов дистанционного зондирования, так как значительно детальнее разрешает резкие приземные градиенты температуры (см. рис. 6в).

В настоящее время ведется активная работа по проверке и калибровке метода измерения скорости ветра с использованием квадрокоптеров. Первые результаты показывают хорошее согласие с другими видами наблюдений, например с данными акустического (содарного) зондирования по части вертикального распределения скорости ветра (см. рис. 6г), а также по части временной изменчивости ветра (для колебаний с периодом в первые десятки секунд и более) при сравнении с данными акустического анемометра IRGASON, рядом с которым квадрокоптеры зависали для интеркалибровки (рис. 7).

Способность мультироторных БПЛА зависать в заданной точке или двигаться строго вертикально открывает возможности для их использования в целях исследования атмосферных процессов над неоднородными ландшафтами. Примеры территорий с четко выраженной неоднородностью: границы морского льда и незамерзающих полыней, между лесом и полем или же границы между застроенной территорией и окружающими естественными ландшафтами. Понимание механизмов формирования микроклимата таких территорий и их взаимодействия с атмосферой важно для разработки параметризаций в численных моделях погоды и климата. Примеры на рис. 8 демонстрируют различия вертикальных профилей температуры, измеренных в двух соседних точках – надо льдом и над незамерзающей полыньей в проливе Большая Салма (на расстоянии около 500 м друг от друга), а также в центре г. Надыма и за чертой города (на расстоянии около 4 км). В обоих случаях хорошо видно, что положительная температурная аномалия (тепловой след полыньи или же эффект городского острова

тепла) в условиях устойчивой стратификации атмосферы локализована в слое толщиной около 50 м, однако существенно меняет условия приземной стратификации атмосферы, что важно, например, в решении задач распространения загрязняющих примесей.

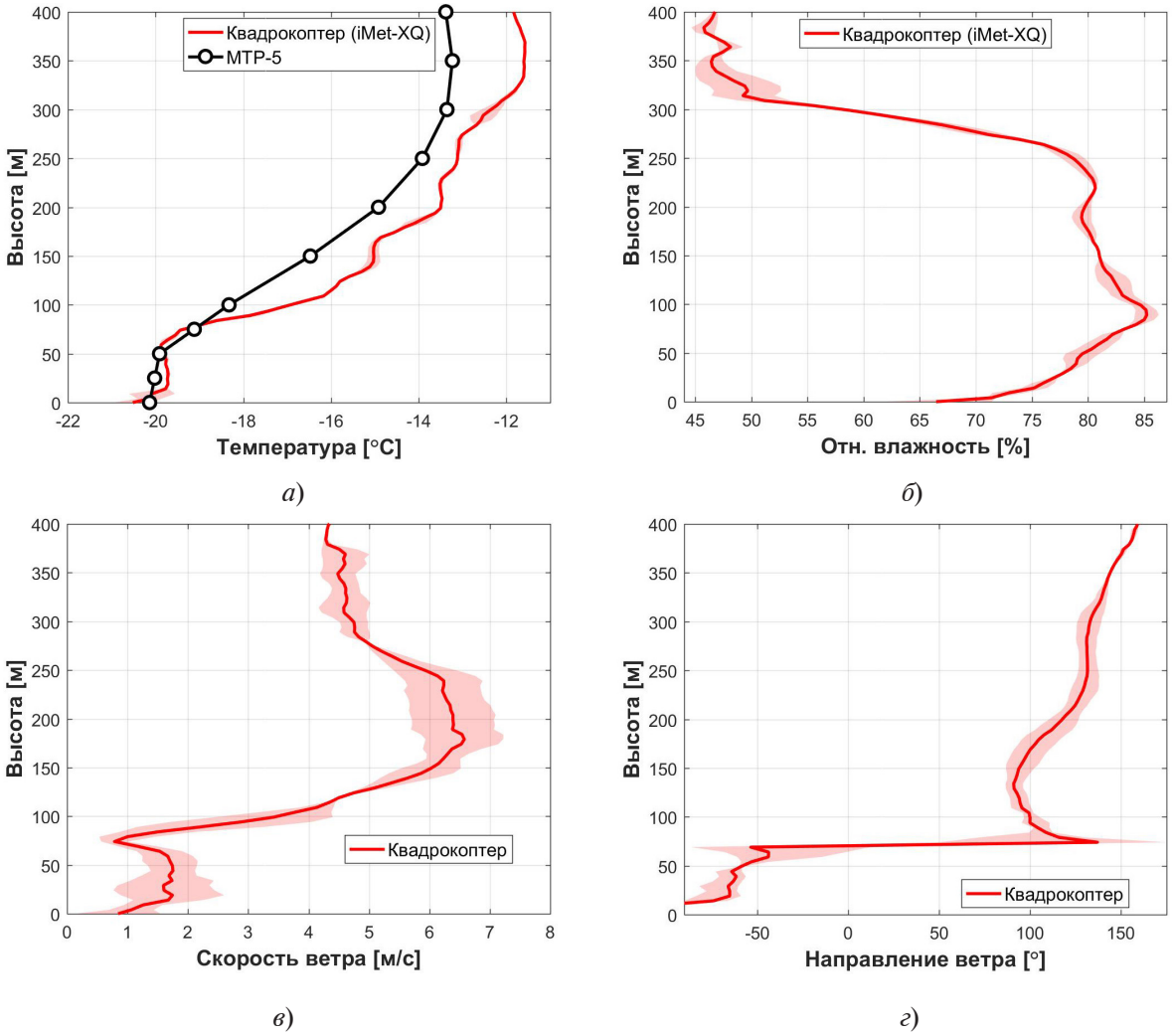


Рис. 5. Вертикальное распределение температуры (*а*), относительной влажности (*б*), скорости (*в*) и направления (*г*) ветра над прибрежной зоной Белого моря в районе Беломорской биологической станции МГУ 28.01.2020 в 13:30 по местному времени. Полупрозрачной заливкой показаны различия метеовеличин между восходящим и нисходящим сегментами полета, красной линией – среднее значение

В случае полыньи такая аномалия температуры характеризует конвективный пограничный слой (КПС), формирование которого часто сопровождается развитием низкоуровневых облаков над полыньей (рис. 9). Измерения с использованием квадрокоптера позволили получить не только вертикальные профили температуры и влажности над полыньей и льдом, но также исследовать горизонтальное распределение и временную динамику этих величин внутри КПС [25]. Для этого квадрокоптер выполнял горизонтальные разрезы надо льдом и полыньей на различных высотах [48] или же зависал в фиксированной точке над полыньей, выполняя роль «летающей метеостанции».

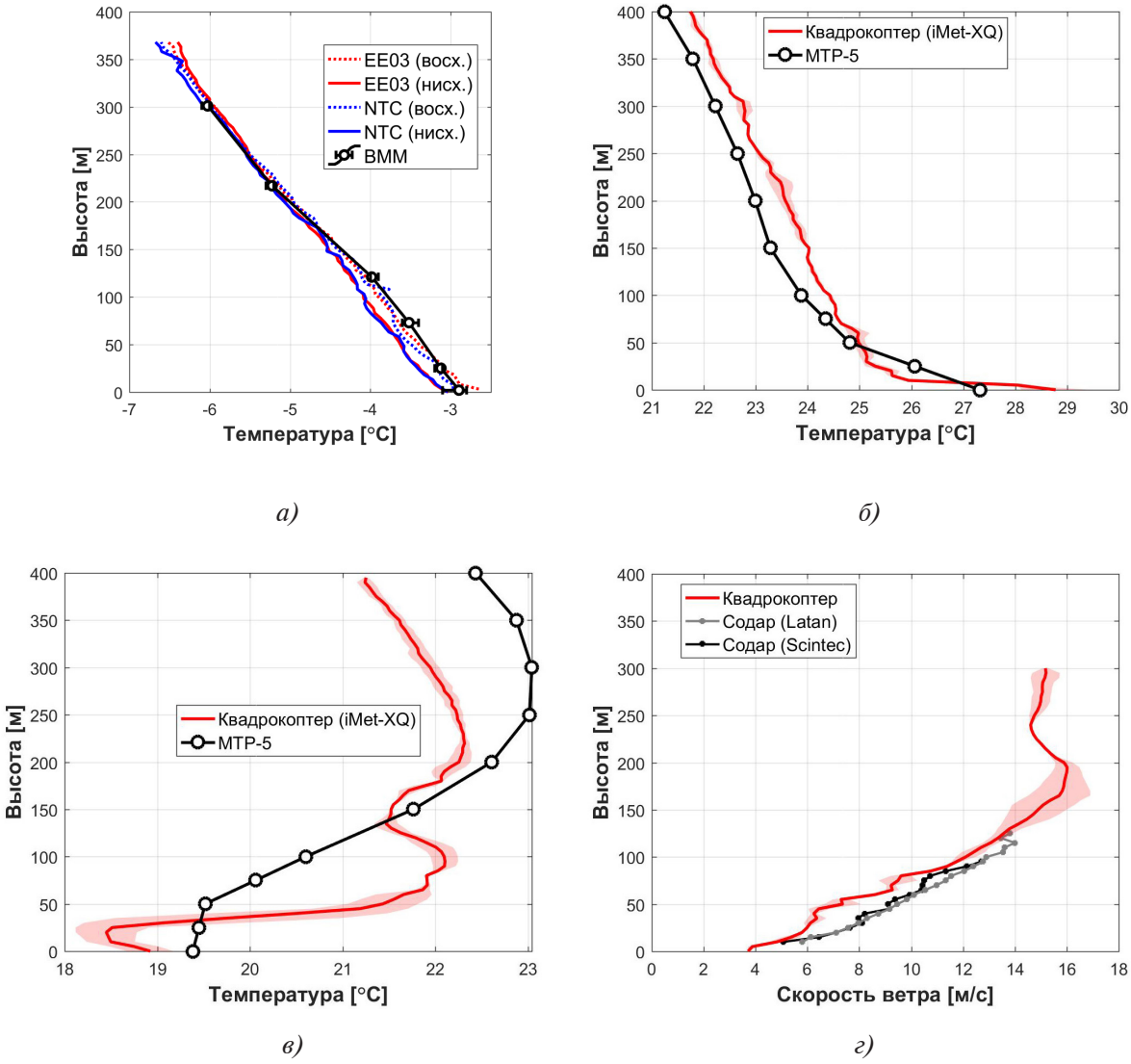


Рис. 6. Примеры сравнения вертикальных профилей температуры по данным зондирования с использованием квадрокоптера: с данными высотной метеорологической мачты в Обнинске 11.03.2018* (*а*); с данными профилемера МТП-5 над однородным степным ландшафтом в Цимлянске днем в 11:20 11.08.2020 (*б*) и в 06:30 10.08.2020 (*в*); сравнение восстановленной по данным квадрокоптера скорости ветра с измерениями двух акустических локаторов (содаров) в Цимлянске в 22:25 08.08.2020 (*г*)

* Примечание: отдельно показаны профили температуры, измеренные двумя датчиками на восходящем и нисходящем сегментах полета

Исследования показали, что даже в отсутствие облаков над полыньей развивается тонкий КПС толщиной 20–40 м. Полученные оценки толщины КПС согласуются с толщиной облачного слоя, формирующегося над полыньей в благоприятных условиях, с предыдущими оценками высоты КПС над той же самой полыньей [48] и с модельными исследованиями, которые предполагают высоту КПС около 50–100 м даже для полыньи шириной ≈1 км [49, 50]. КПС выделяется не только по значениям температуры и влажности, но по временной динамике этих величин: амплитуда их колебаний на масштабах нескольких десятков секунд над полыньей значительно превосходит соответствующие амплитуды надо льдом, что связано с формированием и перемещением внутри КПС отдельных турбулентных структур (термиков).

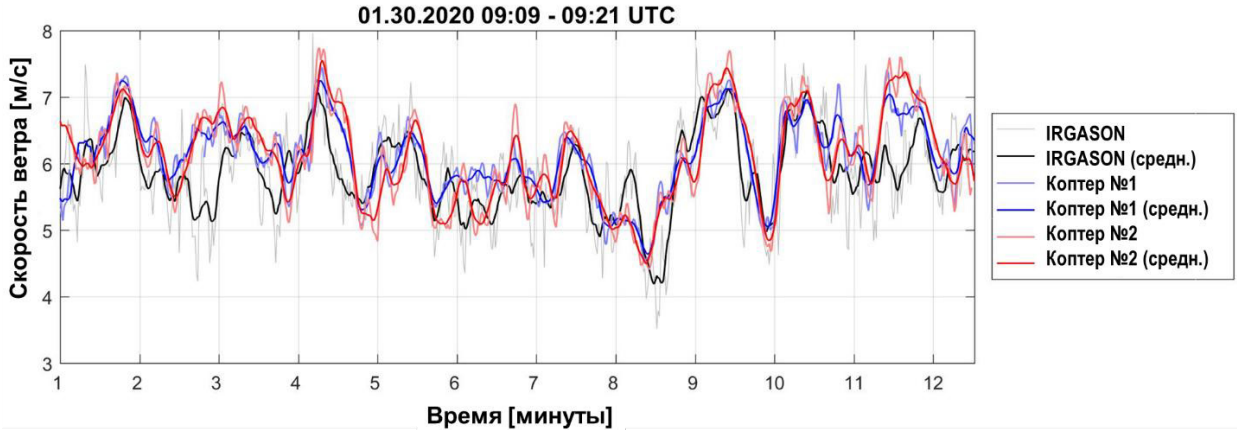
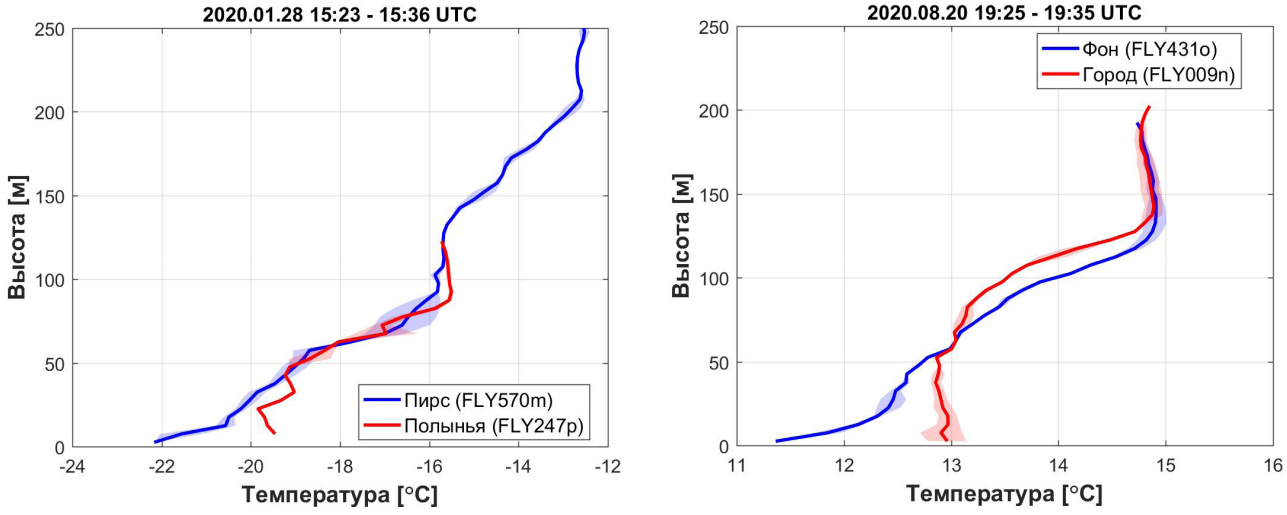


Рис. 7. Динамика скорости ветра по данным двух квадрокоптеров DJI Phantom 4 Pro (коптеры № 1 и № 2) по данным акустического анемометра IRGASON.Кривые на графиках показывают данные с дискретностью 1 с и бегущие средние с периодом 10 с



а) *б*)

Рис. 8. Сравнение вертикальных профилей температуры: надо льдом (над пирсом) и над незамерзающей полыньей на Белом море 28.01.2020 в 18:30 по местному времени (*а*); над г. Надымом и над фоновой точкой за городом 21.08.2020 в 00:30 по местному времени (*б*)

Таким образом, проведенные эксперименты убедительно показали перспективность применения БПЛА для проведения контактных измерений структуры АПС над труднодоступными областями. Такой опыт открывает широкие возможности для новых экспериментальных кампаний, которые могли бы улучшить общее понимание атмосферных процессов над неоднородными ландшафтами, такими как лесные озера и поляны [51], полыньи [49, 52], урбанизированные территории, включая мегаполисы [53–55] и арктические города, где недавно были обнаружены характерные городские острова тепла, ярко выраженные в зимних условиях [56].

Рис. 9. Конвективный пограничный слой над полыньей в прибрежной зоне Белого моря. Съемка с БПЛА

Заключение

Приведенные примеры показывают большие перспективы использования БПЛА различных типов для исследований структуры и динамики атмосферного пограничного слоя. Они могут применяться как для мониторинга, так и в краткосрочных измерительных кампаниях для оценки особенностей АПС в конкретных измерительных условиях. С помощью БПЛА возможно проведение измерений вертикальной и горизонтальной структуры АПС, в том числе и в труднодоступных местах над различными типами подстилающей поверхности. Возможно получение как средних характеристик состояния атмосферы, так и высокочастотных характеристик атмосферной турбулентности. Полученные результаты важны как для понимания физических причин исследуемых явлений, так и для разработки и валидации атмосферных моделей различного разрешения.

В рамках дальнейших исследований представляется перспективной разработка автоматизированных систем мониторинга атмосферы на основе БПЛА. Это позволит применять БПЛА не только в научных экспериментах, но и в решении задач оперативного мониторинга атмосферы в целях повышения точности и надежности прогнозов погоды.

Но при этом необходимо учитывать, что использование БПЛА для исследования АПС требует аккуратной обработки данных и учета ряда особенностей измеряемых величин. Требуется коррекция инерции датчиков, необходимо следить за расположением измерительных систем. В случае измерения профилей 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. Необходимо также учитывать влияние самого аппарата и его движения на характеристики измеряемых величин. Поэтому существует необходимость более детального теоретического понимания погрешности измерений, выполняемых на базе БПЛА, и разработки более сложных методов коррекции [57].

Разработка БПЛА «Цимлянин» и его натурные испытания в г. Цимлянске выполнены за счет гранта РНФ № 18-77-10072. Работы в прибрежных зонах выполнялись за счет гранта РФФИ № 20-05-00834. Эксперименты с использованием квадрокоптеров в г. Надыме выполнялись за счет грантов РФФИ №18-05-60126 и № 20-55-71004.

Список литературы

1. Kaimal J.C., Finnigan J.J. Atmospheric boundary layer flows, their structure and measurements. New York, Oxford: Oxford Univ. Press, 1994. P. 289.

2. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы // Екатеринбург, 2004. 596 с.

3. Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. P. 1–16.

4. Высотная метеорологическая мачта. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Научно-производственное объединение «Тайфун». 2020. URL: http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html (дата обращения: 09.10.2020).

5. Новицкий М.А., Мазурин Н.Ф., Кулижникова Л.К. и др. Сравнение данных измерений ветра при помощи выпускаемого промышленностью содара и высотной метеорологической мачты в Обнинске // Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С. 74–83.

6. Peña A., Floors R., Sathe A., at all. Ten years of boundary-layer and wind-power meteorology at Høvsøre, Denmark // Boundary-Layer Meteorology. 2016. V. 158 (1). P. 1–26.

7. Jonassen M.O., Tisler P., Altstädter B., at all. 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.

8. Kral S., Reuder J., Vihma T., at all. Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR) — The Hailuoto 2017 Campaign // Atmosphere. 2018. V. 9. № 7. P. 268.

9. Каллистратова М.А., Петенко И.В., Кузнецов Р.Д. и др. Содарное зондирование атмосферного пограничного слоя: Обзор работ ИФА им. А.М. Обухова РАН // Известия РАН. ФАО. 2018. Т. 54. № 3. С. 283–300.

10. Baker W.E., Atlas R., Cardinali C., at all. Lidar-measured wind profiles: the missing link in the global observing system // Bull Am Meteor Soc. 2014. V. 95. P. 543–564.

11. Zhou S.H., Wei M., Wang L.J., at all. Wind shear identification with the retrieved wind of Doppler weather radar // Journal of Tropical Meteorology. 2017. V. 23 (2).

12. Troitsky A.V., Gaykovich K.P., Kadygrov E.N., at all. Thermal sounding of the atmosphere boundary layer in oxygen absorbtion band center // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1993. V. 31. № 1. P. 116–120.

13. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., at all. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments // Journal of Atmospheric, and Oceanic Technology. July 1999. V. 16. P. 805–818.

14. 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.

15. Hiyama T., Strunin M.A., Suzuki R., at all. Aircraft Observations of the Atmospheric Boundary Layer over a Heterogeneous Surface in Eastern Siberia // Hydrol. Proc., 2003. V. 17 (14). P. 2885–2911.

16. Strunin M.A., Hiyama T. Aircraft observations of the atmospheric boundary layer over the Lena river lowland: part 1. Mesoscale structure // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2005. T. 41. № 2. C. 156–177.

17. Strunin M.A., Hiyama T. Aircraft observations of the atmospheric boundary layer over the Lena river lowland: part 1. Spectral structure // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2005. T. 41. № 3. C. 342–360.

18. Strunin M.A., Hiyama T. Spectral structure of small-scale turbulent and mesoscale fluxes in the atmospheric boundary layer over a thermally inhomogeneous land surface // Boundary-Layer Meteorol. 2005. V. 117. P. 479–510.

19. Konrad T.G., Hill M.L., Rowland J.R., Meyer J.H. A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorlogical Sensors // APL Technical Digest. 1979. P. 11–19.

20. Boer G., Ivey M., Schmid B., at all. A bird's-eye view: Development of an operational ARM unmanned aerial capability for atmospheric research in arctic Alaska // Bulletin of the American Meteorological Society. 2018. V. 99 (6). P. 1197–1212.

21. Reuder J., Brisset P., Jonassen M., at all. The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research // Meteorologische Zeitschrift. 2009. V. 18 (2). P. 141–147.

22. Spiess T., Bange J., Buschmann M., Vörsmann P. First application of the meteorological Mini-UAV «M2AV» // Meteorologische Zeitschrift. 2007. V. 16 (2). P. 159–169.

23. Varentsov M.I., Yu Artamonov A., Pashkin A.D., Repina I.A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 231. P. 12053.

24. Wildmann N., Bernard S., Bange J. Measuring the local wind field at an escarpment using small remotely-piloted aircraft // Renewable Energy. 2017. V. 103. P. 613–619.

25. Варенцов М.И., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д., Репина И.А. Использование квадрокоптера для метеорологических измерений в пограничном слое атмосферы // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сб. тр. М.: Физматкнига, 2018. С. 202–212.

26. Elston J., Argrow B., Stachura M., at all. Overview of Small Fixed-Wing Unmanned Aircraft for Meteorological Sampling // J. Atmos. Oceanic Technol. 2015. V. 32. P. 97–115.

27. Cassano J.J., Seefeldt M.W., Palo S., at all. Observations of the atmosphere and surface state over Terra Nova Bay, Antarctica, using unmanned aerial systems // Earth Syst. Sci. Data. 2016. V. 8. P. 115–126.

28. Reuder J., Jonassen M.O., Ólafsson H. The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: Recent developments and applications of a micro-UAS for atmospheric boundary layer research // Acta Geophys. 2012. V. 60. P. 1454–1473.

29. Bange J., Esposito M., Lenschow D.H., at all. Measurement of aircraft state and thermodynamic and dynamic variables // In Airborne Measurements for Environmental Research: Methods and Instruments; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA: Weinheim, Germany, 2013. P. 7–75.

30. Lenschow D.H. Aircraft Measurements in the Boundary Layer // In Probing the Atmospheric Boundary Layer; Ed. Lenschow D.H.; American Meteorological Society: Boston, MA, USA, 1986. P. 39–53.

31. Wildmann N., Mauz M., Bange J. Two fast temperature sensors for probing of the atmospheric boundary layer using small remotely piloted aircraft (RPA) // Atmos. Meas. Tech. 2013. V. 6. P. 2101–2113.

32. Zappa C.J., Brown S.M., Laxague N.J., at all. Using Ship-Deployed High-Endurance Unmanned Aerial Vehicles for the Study of Ocean Surface and Atmospheric Boundary Layer Processes // Frontiers in Marine Science. 2020. V. 6. P. 777.

33. Reineman B.D., Lenain L., Statom N.M., Melville W.K. Development and Testing of Instrumentation for UAV-Based Flux Measurements within Terrestrial and Marine Atmospheric Boundary Layers // J. Atmos. Oceanic Technol. 2013. V. 30. P. 1295–1319.

34. Wildmann N., Rau G.A., Bange J. Observations of the Early Morning Boundary-Layer Transition with Small Remotely-Piloted Aircraft // Boundary-Layer Meteorol. 2015. V. 157. P. 345.

35. 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.

36. Roldán J.J., Joossen G., Sanz D., at all. Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses // Sensors (Switzerland). 2015. V. 15. № 2. P. 3334–3350.

37. Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестник Поволжского гос. технологич. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. Т. 32. № 4. С. 34–46.

38. Воскресенский И.С., Сучилин А.А., Ушакова Л.А. и др. 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.

39. Ajayi O.G., Salubi A.A., Angbas A.F., Odigure 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.

40. Cimoli E., Marcer M., Vandecrux B., at al. 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.

41. DeMario A., Lopez P., Plewka E., at al. Water Plume Temperature Measurements by an Unmanned Aerial System (UAS) // Sensors. 2017. V. 17. № 2. P. 306.

42. Li F., Yang W., Liu X., at all. 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.

43. Nishar A., Richards S., Breen D., at all. 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.

44. Lampert A., Altstädter B., Bärfuss K., at all. Unmanned Aerial Systems for Investigating the Polar Atmospheric Boundary Layer — Technical Challenges and Examples of Applications. 2020. URL: https://doi.org/10.3390/atmos11040416 (дата обращения: 09.10.2020).

45. Neumann P.P., Bartholmai M. Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit // Sensors and Actuators, A: Physical. 2015. V. 235. P. 300–310.

46. Palomaki R.T., Rose N.T., van den Bossche M., at all. Wind estimation in the lower atmosphere using multirotor aircraft // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2017. V. 34(5). P. 1183–1191.

47. Segales A.R., Greene B.R., Bell T.M., at all. The CopterSonde : An Insight into the Development of a Smart UAS for Atmospheric Boundary Layer Research, (January), 2020. P. 1–21.

48. Степаненко В.М., Дебольский А.В., Варенцов М.И. и др. Изучение атмосферной конвекции над арктической полыньей с применением суперкомпьютерных вычислений и спутниковых данных высокого разрешения // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2011. № 10. С. 52–55.

49. Esau I.N. Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: Large-eddy simulation study // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № D8. P. D08109.

50. Vihma T., Pirazzini R., Fer I., at all. 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.

51. Barskov K., Stepanenko V., Repina I., at all. Two Regimes of Turbulent Fluxes Above a Frozen Small Lake Surrounded by Forest // Boundary-Layer Meteorology. 2019. V. 173, No. 3. P. 311–320.

52. 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.

53. 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 ун-та. Сер. 5: География. 2017. № 6. С. 25–37.

54. Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В. и др. О высотной протяженности городского «острова тепла» над Москвой // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 2. С. 213–217.

55. 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.

56. 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.

References

1. Kaimal J.C., Finnigan J.J. (1994) Atmospheric boundary layer flows, their structure and measurements. New York, Oxford: Oxford Univ. Press. P. 289.

2. Ivanov V.E., Fridzon M.B., Essyak S.P. (2004) *Radiozondirovanie atmosfery* [Radio sounding of the atmosphere]. Ekaterinburg. P. 596.

3. Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C. (2010) Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. Journal of Geophysical Research. V. 115. P. 1–16.

4. *Vysotnaya meteorologicheskaya machta. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy Nauchno-proizvodstvennoe ob"edinenie «Tayfun»* [High-altitude meteorological mast. Federal

Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Research and Production Association «Typhoon»] (2020). Available at: http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html (date of access: 09.10.2020).

5. Novitsky M.A., Mazurin N.F., Kulizhnikova L.K. et al. (2011) *Sravnenie dannykh izmereniy vetra pri pomoshchi vypuskaemogo promyshlennost'yu sodara i vysotnoy meteorologicheskoy machty v Obninske* [Comparison of wind measurement data using an industry-produced sodar and a high-altitude meteorological mast in Obninsk] *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. No. 10. P. 74–83.

6. Peña A., Floors R., Sathe A., at all. (2016) Ten years of boundary-layer and wind-power meteorology at Høvsøre, Denmark. Boundary-Layer Meteorology. 2016. V. 158 (1). P. 1–26.

7. Jonassen M.O., Tisler P., Altstädter B., at all. (2015) Application of remotely piloted aircraft systems in observing the atmospheric boundary layer over Antarctic sea ice in winter. Polar Res. V. 34. P. 1–15.

8. Kral S., Reuder J., Vihma T., at all. (2018) Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR) — The Hailuoto 2017 Campaign. Atmosphere. V. 9. No. 7. P. 268.

9. Kallistratova M.A., Petenko I.V., Kuznetsov R.D., etc. (2018) *Sodarnoe zondirovanie atmosfernogo pogranichnogo sloya: Obzor rabot IFA im. A.M. Obukhova RAN* [Sodar sounding of the atmospheric boundary layer: a Review of the works of the Obukhov Institute of the Russian Academy of Sciences] *Izvestiya RAN FAO* [Izvestiya RAS. FAO]. Vol. 54. No. 3. P. 283–300.

10. Baker W.E., Atlas R., Cardinali C., at all. (2014) Lidar-measured wind profiles: the missing link in the global observing system. Bull Am Meteor Soc. V. 95. P. 543–564.

11. Zhou S.H., Wei M., Wang L.J., at all. (2017) Wind shear identification with the retrieved wind of Doppler weather radar. Journal of Tropical Meteorology. V. 23 (2).

12. Troitsky A.V., Gaykovich K.P., Kadygrov E.N., at all. (1993) Thermal sounding of the atmosphere boundary layer in oxygen absorbtion band center. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. V. 31. No. 1. P. 116–120.

13. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., at all. (1999) Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments. Journal of Atmospheric, and Oceanic Technology. July. V. 16. P. 805–818.

14. Kadygrov E.N., Pick D.R. (1998) The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons within situ observations. Meteorol. Appl. V. 5. No. 4. P. 393–404.

15. Hiyama T., Strunin M.A., Suzuki R., at all. (2003) Aircraft Observations of the Atmospheric Boundary Layer over a Heterogeneous Surface in Eastern Siberia. Hydrol. Proc. V. 17 (14). P. 2885–2911.

16. Strunin M.A., Hiyama T. (2005) Aircraft observations of the atmospheric boundary layer over the Lena river lowland: part 1. Mesoscale structure. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. T. 41. No. 2. C. 156–177.

17. Strunin M.A., Hiyama T. (2005) Aircraft observations of the atmospheric boundary layer over the Lena river lowland: part 1. Spectral structure. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. T. 41. No. 3. C. 342–360.

18. Strunin M.A., Hiyama T. (2005) Spectral structure of small-scale turbulent and mesoscale fluxes in the atmospheric boundary layer over a thermally inhomogeneous land surface. Boundary-Layer Meteorol. V. 117. P. 479–510.

19. Konrad T.G., Hill M.L., Rowland J.R., Meyer J.H. (1979) A Small, Radio-Controlled Aircraft as a Platform for Meteorlogical Sensors. APL Technical Digest. P. 11–19.

20. Boer G., Ivey M., Schmid B., at all. (2018) A bird's-eye view: Development of an operational ARM unmanned aerial capability for atmospheric research in arctic Alaska. Bulletin of the American Meteorological Society. V. 99 (6). P. 1197–1212.

21. Reuder J., Brisset P., Jonassen M., at all. (2009) The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research. Meteorologische Zeitschrift. V. 18 (2). P. 141–147.

22. Spiess T., Bange J., Buschmann M., Vörsmann P. (2007) First application of the meteorological Mini-UAV «M2AV». Meteorologische Zeitschrift. V. 16 (2). P. 159–169.

23. Varentsov M.I., Yu Artamonov A., Pashkin A.D., Repina I.A. (2019) Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 231. P. 12053.

24. Wildmann N., Bernard S., Bange J. (2017) Measuring the local wind field at an escarpment using small remotely-piloted aircraft. Renewable Energy. V. 103. P. 613–619.

25. Varentsov M.I., Artamonov A.Yu., Pashkin A.D., Repina I.A. (2018) *Ispol'zovanie kvadrokoptera dlya meteorologicheskikh izmereniy v pogranichnom sloe atmosfery* [Use of a quadcopter for meteorological measurements in the atmospheric boundary layer] *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata: sb. tr. Fizmatkniga* [Turbulence, dynamics of the atmosphere and climate: collection of articles. tr. Fizmatkniga]. Moscow. P. 202–212.

26. Elston J., Argrow B., Stachura M., at all. (2015) Overview of Small Fixed-Wing Unmanned Aircraft for Meteorological Sampling. J. Atmos. Oceanic Technol. V. 32. P. 97–115.

27. CassaNo. J.J., Seefeldt M.W., Palo S., at all. (2016) Observations of the atmosphere and surface state over Terra Nova Bay, Antarctica, using unmanned aerial systems. Earth Syst. Sci. Data. V. 8. P. 115–126.

28. Reuder J., Jonassen M.O., Ólafsson H. (2012) The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: Recent developments and applications of a micro-UAS for atmospheric boundary layer research. Acta Geophys. V. 60. P. 1454–1473.

29. Bange J., Esposito M., Lenschow D.H., at all. (2013) Measurement of aircraft state and thermodynamic and dynamic variables. In Airborne Measurements for Environmental Research: Methods and Instruments; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA: Weinheim, Germany. P. 7–75.

30. Lenschow D.H. (1986) Aircraft Measurements in the Boundary Layer. In Probing the Atmospheric Boundary Layer. Ed. Lenschow D.H. American Meteorological Society: Boston, MA, USA. P. 39–53.

31. Wildmann N., Mauz M., Bange J. (2013) Two fast temperature sensors for probing of the atmospheric boundary layer using small remotely piloted aircraft (RPA). Atmos. Meas. Tech. V. 6. P. 2101–2113.

32. Zappa C.J., Brown S.M., Laxague N.J., at all. (2020) Using Ship-Deployed High-Endurance Unmanned Aerial Vehicles for the Study of Ocean Surface and Atmospheric Boundary Layer Processes. Frontiers in Marine Science. V. 6. P. 777.

33. Reineman B.D., Lenain L., Statom N.M., Melville W.K. (2013) Development and Testing of Instrumentation for UAV-Based Flux Measurements within Terrestrial and Marine Atmospheric Boundary Layers. J. Atmos. Oceanic Technol. V. 30. P. 1295–1319.

34. Wildmann N., Rau G.A., Bange J. (2015) Observations of the Early Morning Boundary-Layer Transition with Small Remotely-Piloted Aircraft. Boundary-Layer Meteorol. V. 157. P. 345.

35. Patel P.N., Patel M.A., Faldu R.M., Dave Y.R. (2013) Quadcopter for Agricultural Surveillance. Adv. Electron. Electr. Eng. V. 3. No. 4. P. 427–432.

36. Roldán J.J., Joossen G., Sanz D., at all. (2015) Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses. Sensors (Switzerland). V. 15. No. 2. P. 3334–3350.

37. Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. (2016) *Opyt primeneniya kvadrokoptera dlya monitoringa vozobnovleniya lesa* [Experience in using a quadcopter to monitor forest regeneration] *Vestnik Povolzhskogo gos. tekhnologich. un-ta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State technological university: Forest. Ecology. Nature management]. T. 32. No. 4. P. 34–46.

38. Voskresensky I.S., Suchilin A.A., Ushakova L.A. et al. (2018) *Izuchenie morfologii opolznya na osnove dannykh GNSS i vozdushnogo zondirovaniya (na primere uchastka doliny r. Protva)* [Study of the morphology of landslide on the basis of GNSS and airborne sounding data (on the example of a section of the Protva river valley)] *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering research]. Vol. 12. No. 5–6. P. 50–57.

39. Ajayi O.G., Salubi A.A., Angbas A.F., Odigure M.G. (2017) Generation of accurate digital elevation models from UAV acquired low percentage overlapping images. Int. J. Remote Sens. V. 38. No. 8–10. P. 3113–3134.

40. Cimoli E., Marcer M., Vandecrux B., at al. (2017) Application of Low-Cost UASs and Digital Photogrammetry for High-Resolution Snow Depth Mapping in the Arctic. Remote Sens. V. 9. No. 11. P. 1144.

41. DeMario A., Lopez P., Plewka E., at al. (2017) Water Plume Temperature Measurements by an Unmanned Aerial System (UAS). Sensors. V. 17. No. 2. P. 306.

42. Li F., Yang W., Liu X., at all. (2018) Using high-resolution UAV-borne thermal infrared imagery to detect coal fires in Majiliang mine, Datong coalfield, Northern China. Remote Sens. Lett. V. 9. No. 1. P. 71–80.

43. Nishar A., Richards S., Breen D., at all. (2016) 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. V. 86. P. 1256–1264.

44. Lampert A., Altstädter B., Bärfuss K., at all. (2020) Unmanned Aerial Systems for Investigating the Polar Atmospheric Boundary Layer — Technical Challenges and Examples of Applications. Available at: https://doi.org/10.3390/atmos11040416 (date of access: 09.10.2020).

45. Neumann P.P., Bartholmai M. (2015) Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit. Sensors and Actuators, A: Physical. V. 235. P. 300–310.

46. Palomaki R.T., Rose N.T., van den Bossche M., at all. (2017) Wind estimation in the lower atmosphere using multirotor aircraft. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. V. 34(5). P. 1183–1191.

47. Segales A.R., Greene B.R., Bell T.M., at all. (2020) The CopterSonde: An Insight into the Development of a Smart UAS for Atmospheric Boundary Layer Research, (January). P. 1–21.

48. Stepanenko V.M., Debolskiy A.V., Varentsov M.I. et al. (2011) *Izuchenie atmosfernoy konvektsii nad arkticheskoy polyn'ey s primeneniem superkomp'yuternykh vychisleniy i sputnikovykh dannykh vysokogo razresheniya* [Study of atmospheric convection over the Arctic polynia using supercomputer calculations and high-resolution satellite data] *Zemlya iz kosmosa: naibolee effektivnye resheniya* [Earth from space: is the most effective solution]. No. 10. P. 52–55.

49. Esau I.N. (2007) Amplification of turbulent exchange over wide Arctic leads: Large-eddy simulation study. J. Geophys. Res. V. 112. No. D8. P. D08109.

50. Vihma T., Pirazzini R., Fer I., at all. (2014) Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: A review. Atmos. Chem. Phys. V. 14. No. 17. P. 9403–9450.

51. Barskov K., Stepanenko V., Repina I., at all. (2019) Two Regimes of Turbulent Fluxes Above a Frozen Small Lake Surrounded by Forest. Boundary-Layer Meteorology. V. 173. No. 3. P. 311–320.

52. Burk S.D., Fett R.W., Englebretson R.E. (1997) Numerical simulation of cloud plumes emanating from Arctic leads. J. Geophys. Res. Atmos. V. 102. No. D14. P. 16529–16544.

53. Varentsov M.I., Samsonov T.E., Kislov A.V., Konstantinov P.I. (2017) *Vosproizvedenie ostrova tepla Moskovskoy aglomeratsii v ramkakh regional'noy klimaticheskoy modeli COSMO-CLM* [Reproduction of the heat island of the Moscow agglomeration in the framework of the regional climate model COSMO-CLM] *Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. 5: Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Ser. 5. Geography]. Moscow. No. 6. P. 25–37.

54. Lokoshchenko M.A., Korneva I.A., Kochin A.V. et al. (2016) *O vysotnoy protyazhennosti gorodskogo «ostrova tepla» nad Moskvoy* [On the altitude length of the city «heat island» over Moscow] *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. Vol. 466, No. 2. P. 213–217.

55. Chow W., Ho D. (2016) Investigating the vertical dimension of Singapore's urban heat island through quadcopter platforms: an pilot study. Geophysical Research Abstracts. V. 5690.

56. Jacobi C., Scherf A., Siemer A.H., Roth R. (1995) On the influence of sensor inertia on the estimation of turbulent fluxes from aircraft measurements. Boundary-Layer Meteorol. V. 76. No. 1–2. P. 97–108.