

УДК 551.511.63

## ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА<sup>1</sup>

© 2021 г. Д. Г. Чечин<sup>а</sup>, \*, А. Ю. Артамонов<sup>а</sup>, Н. Е. Бодунков<sup>б</sup>, Д. Н. Живоглотов<sup>с</sup>, Д. В. Зайцева<sup>а</sup>,  
М. Ю. Калягин<sup>б</sup>, Д. Д. Кузнецов<sup>а</sup>, А. А. Кунашук<sup>б</sup>, М. А. Шевченко<sup>д</sup>, А. А. Шестакова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

<sup>б</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993 Россия

<sup>с</sup>Центральная аэрологическая обсерватория, Первомайская ул., 3, Долгопрудный, 141700 Россия

<sup>д</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
Институтская ул., 4/1, Новосибирск, 630090 Россия

\*E-mail: chechin@ifaran.ru

Поступила в редакцию 12.05.2021 г.

После доработки 25.05.2021 г.

Принята к публикации 09.06.2021 г.

Растущая актуальность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для исследования турбулентности в атмосферном пограничном слое связана с необходимостью в получении новых данных наблюдений на различных высотах в пограничном слое, а также над неоднородными ландшафтами. Этому требуются задачи развития моделей турбулентности для пространственно-неоднородных и нестационарных условий. В настоящей работе описывается новый БПЛА “Цимлянин” и его бортовой измерительный комплекс, разработанные специально для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя. БПЛА “Цимлянин” отличается от аналогичных аппаратов гибридной схемой, которая сочетает возможность вертикального взлета и посадки и горизонтального полета в самолетном режиме. В измерительный комплекс входят специально созданные измерительные приборы, а именно многоканальный приемник воздушных давлений и малоинерционный термометр сопротивления. Также были разработаны аналого-цифровые преобразователи и комплекс опроса датчиков и регистрации показаний. В работе приводятся результаты измерений, выполненных с помощью БПЛА во время тестовых полетов в Цимлянске в августе 2020 г. Получено хорошее согласие наблюдений БПЛА в отношении вертикальных профилей температуры воздуха, скорости и направления ветра, дисперсии вертикальной скорости с данными наблюдений других комплексов – акустических анемометров, автоматической метеостанции, содаров и температурного профилимера. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал разработанного БПЛА для применения к задачам исследования турбулентности в атмосферном пограничном слое.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, атмосферный пограничный слой, турбулентность

**DOI:** 10.31857/S0002351521050047

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения многих актуальных проблем физики атмосферного пограничного слоя (АПС) необходимы наблюдения с хорошим пространственно-временным разрешением на различных высотах в пределах пограничного слоя. Это прежде всего относится к задачам описания турбулентного обмена над неоднородной подстилающей поверх-

ностью [1], взаимодействия мелкомасштабной турбулентности с мезомасштабными циркуляциями [2], когерентными структурами [3] и др.

Для изучения этих процессов наилучшей стратегией организации полевых экспериментов является проведение пульсационных измерений на нескольких уровнях на стационарно установленной мачте [4], организация пространственно-разнесенных точек измерений [5, 6], а также применение содаров и лидаров для дистанционного зондирования пограничного слоя [7, 8]. Кроме того, мобильные измерения, проводимые с помощью самолетов-лабораторий, предоставляют крайне

<sup>1</sup> Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти акад. А.М. Обухова (Москва, 10–12 ноября 2020 г.).

важные данные о пространственной структуре АПС [9] и не только дополняют данные стационарных измерений, но и часто являются единственно возможным источником наблюдений, особенно в труднодоступных районах, например над полярными в Арктике [10], в прикромочной зоне морского льда [11], акваториями рек [9].

Проведение самолетных наблюдений является дорогостоящим и сложным с точки зрения логистики и организации мероприятием. В связи с этим в последнее время началось активное развитие методов измерений средней и турбулентной структуры пограничного слоя с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [12, 13]. Попытки применения БПЛА для исследования атмосферной турбулентности осуществлялись и ранее [14], но активное применение БПЛА стало возможно только в недавнее время благодаря развитию, миниатюризации и удешевлению элементной базы, в особенности систем автопилота, инерциально-навигационных систем, метеорологических датчиков, систем сбора и регистрации данных.

Опубликованные результаты применения БПЛА для исследования турбулентности в АПС показывают [15–18], что наиболее часто используемой является самолетная схема летательного аппарата. Существуют примеры применения мультикоптерной схемы [19], но она имеет ряд недостатков при исследовании турбулентности. К ним относится существенное возмущение воздушного потока работающими пропеллерами, а также сравнительно малое полетное время и дальность полета, что связано с большой потребляемой мощностью [19]. Гибридная схема, которая сочетает вертикальный взлет и посадку в коптерном режиме и горизонтальный полет в самолетном режиме, наиболее предпочтительна, так как минимизирует риск повреждения датчиков при посадке.

Что касается используемых измерительных комплексов, то на настоящий момент на рынке не существует готового продукта, и каждая научная группа занимается разработкой собственного комплекса. Такие комплексы представляют собой компактные аналоги комплексов, применяемых на пилотируемых самолетах-лабораториях. В них, как правило, входит многоканальный приемник воздушных давлений, инерциальная навигационная система и малоинерционный датчик температуры воздуха [15, 16]. На более крупных БПЛА используются также оптические датчики для измерения пульсаций влажности воздуха [20]. Обязательным этапом разработки комплекса является калибровка входящих в него датчиков и всего комплекса в целом, что включает в себя сравнение получаемых измерений с референсными калиброванными приборами, а также теоретически модели.

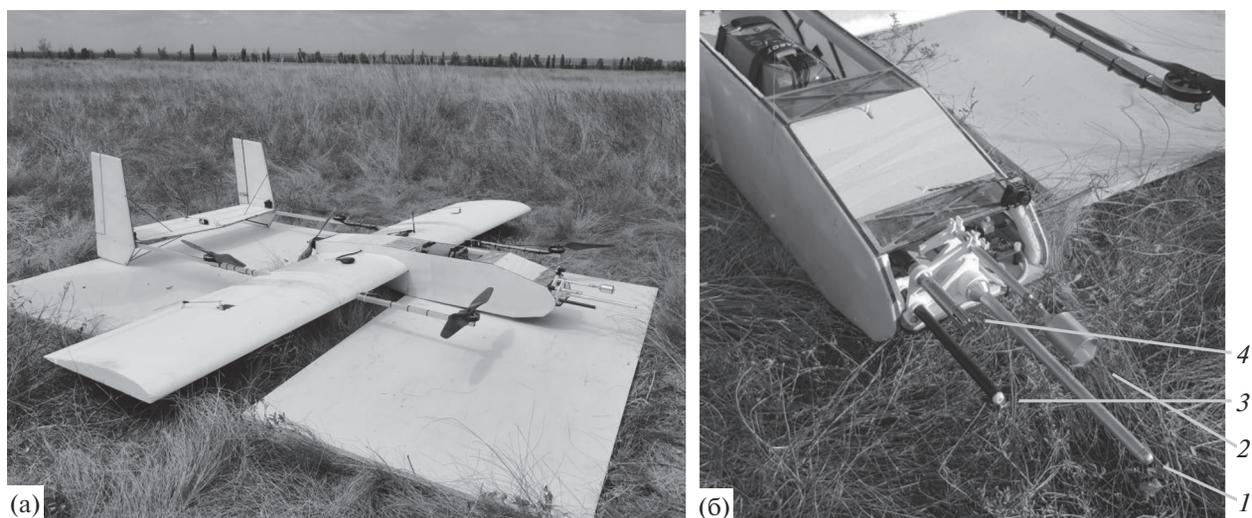
В данной статье приводится описание нового БПЛА “Цимлянин” и его измерительного комплекса, специально разработанных для исследования атмосферного пограничного слоя в сотрудничестве между Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) и Московским авиационным институтом (МАИ). БПЛА “Цимлянин” использует наиболее предпочтительную гибридную схему. Для измерительного комплекса БПЛА “Цимлянин” были специально разработаны несколько измерительных устройства. К ним относится семи-канальный приемник воздушных давлений, разработанный в Институте теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН (ИТПМ СО РАН), а также малоинерционный термометр сопротивления, чувствительным элементом которого является тонкая платиновая нить, разработанный в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО). Также в МАИ были разработаны устройства оцифровки аналоговых сигналов нескольких датчиков и комплекс опроса и регистрации показаний датчиков.

В работе приводятся результаты первых полетов БПЛА “Цимлянин”, проведенных во время измерительной кампании в августе 2020 г. на научной базе ИФА РАН в Цимлянске. Целью этих полетов являлась отработка функционирования комплекса в целом и различных его элементов, а также верификация измерений на основе сравнения с данными других приборов. Решение последней задачи было возможно благодаря проведению одновременных измерений с помощью акустических анемометров, установленных на 30-метровой мачте, а также с помощью двух содаров Scintec и ЛАТАН и температурного профилемера МТП-5.

## 2. БПЛА “ЦИМЛЯНИН”

На этапе разработки БПЛА “Цимлянин” были сформулированы требования к его летным характеристикам с учетом планируемого использования для измерений в АПС. В частности, типичные схемы полета включают в себя горизонтальные пролеты длиной от одного до нескольких километров на различных высотах в АПС для сбора турбулентных статистик, а также набор высоты до верхней границы АПС и последующий спуск. Кроме того, схема БПЛА должна обеспечивать возможность установки датчиков в невозмущенном потоке. С учетом этих требований был разработан БПЛА, представленный на рис. 1.

БПЛА “Цимлянин” имеет алюминиевую рамную структуру, к которой крепятся подъемные винты, хвостовое оперение, консоли крыльев и фюзеляж (рис. 1а). Внутри фюзеляжа располагаются автопилот, блоки оцифровки, опроса и регистрации данных (бортовой компьютер), аккумуляторы питания электродвигателей и комплек-



**Рис. 1.** БПЛА “Цимлянин” (а) и метеорологические датчики (б): 1 – многоканальный приемник воздушных давлений; 2 – малоинерционный термометр сопротивления; 3 – датчик относительной влажности воздуха P14 Rapid (IST); 4 – датчик температуры и влажности воздуха HMP110 Vaisala.

са полезной нагрузки. Характеристики БПЛА приведены в табл. 1.

В разработанный измерительный комплекс входят многоканальный приемник воздушных давлений (МПВД ИТПМ СО РАН), инерциальная навигационная система (ИНС) Ellipse-2N (SBG Systems), малоинерционный термометр сопротивления (ЦАО), датчик влажности и температуры воздуха Vaisala HMP110, инфракрасный датчик температуры поверхности (Melexis) и датчик влажности воздуха P14 Rapid (IST). Метеорологические датчики вынесены в воздушный поток перед носовой частью БПЛА на расстояние порядка 15–20 см (рис. 1б). Опубликованные ранее исследования для БПЛА схожих габаритов показали, что на таком расстоянии создаваемые корпусом БПЛА возмущения поля давления малы для типичной скорости полета порядка 15–25 мс<sup>-1</sup>.

МПВД был разработан в ИТПМ СО РАН на основе опыта создания подобных приборов для пилотируемых самолетов [21]. Он предназначен для измерения воздушной скорости и углов атаки и скольжения, которые совместно с данными ИНС используются для расчета трех компонент скорости ветра [22].

Малоинерционный термометр сопротивления в качестве чувствительного элемента использует платиновую нить толщиной 30 мкм. Номинальное сопротивление датчика составляет 100 Ом. Зависимость сопротивления от температуры была установлена в климатической камере ЦАО. В новом датчике платиновая нить находится непосредственно в воздушном потоке, что обеспечивает малое время отклика. Блок усиления и ана-

лого-цифровой преобразователь для датчика были разработаны совместно с МАИ.

Датчик температуры и влажности HMP110 Vaisala имеет постоянную времени порядка 5 с для температуры и 7 с для влажности и используется для измерения средних температуры и влажности воздуха. Датчик влажности P14 Rapid имеет время отклика порядка 1.5 с при температуре +20°C, что позволяет измерять флуктуации влажности, обусловленные наиболее крупными энергонесущими турбулентными вихрями. Более того, второе поколение датчика P14 Rapid-2, которое планируется использовать в будущем, имеет заявленное время отклика в три раза меньше, т.е. доходящее до 0.5 с. Хотя этого недостаточно для разрешения всего спектра турбулентных флуктуаций влажности, такой датчик является компактной и недорогой альтернативой более тяжелым и дорогим оптическим датчикам влажности, вес которых вместе с блоком электроники достигает нескольких килограмм.

Измерительный комплекс имеет модульную структуру, что позволяет использовать различные

**Таблица 1.** Характеристики БПЛА “Цимлянин”

Характеристика	Значение
Взлетная масса, кг	11
Масса полезной нагрузки, кг	1.7
Максимальная скорость, м/с	32
Крейсерская скорость, м/с	22
Продолжительность полета, мин	60
Размах крыльев, м	2.4

комбинации датчиков и дополнять комплекс новыми датчиками. В основе комплекса лежит использование одноплатного процессора Raspberry Pi-4, который осуществляет опрос датчиков, контроль за передачей и записью данных. Опрос всех датчиков, кроме НМР110, осуществляется с частотой 100 Гц. Для каждого измерения выставляется метка единого для всего комплекса времени, за счет чего обеспечивается синхронизация показаний различных датчиков между собой. Также регистрируется время GPS, что обеспечивает синхронизацию внутреннего времени с глобальным.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА

В данной работе приводятся результаты измерения трех компонент скорости ветра с помощью БПЛА. Вектор скорости ветра определяется как разность вектора воздушной скорости относительно летательного аппарата и вектора скорости самого аппарата относительно Земли. Первый вектор определяется с помощью многоканального приемника воздушных давлений, установленного на носу БПЛА. В частности, измеряются модуль воздушной скорости и углы атаки и скольжения. Измерения производятся в системе координат летательного аппарата. Ориентация этой системы координат относительно географической системы координат, связанной с Землей, определяется углами крена, тангажа и рысканья БПЛА, которые измеряются с помощью инерциальной навигационной системы с использованием гироскопов и акселерометров. Вектор скорости БПЛА в географической системе координат известен из измерений инерциальной навигационной системы, использующей в дополнение к гироскопам данные глобальной спутниковой навигационной системы. Формулы, используемые для расчета трех компонент скорости ветра, приведены в работах [22].

### 4. ИЗМЕРЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ТЕСТОВЫХ ПОЛЕТОВ В ЦИМЛЯНСКЕ

За период с 7 по 14 августа 2020 г. было совершено 10 полетов, в ходе которых отработывалось функционирование различных элементов измерительного комплекса и всего комплекса в целом. Мы приведем результаты измерений, полученных во время трех полетов 13-го августа. В этот день в дневное время в районе станции развивался хорошо перемешанный конвективный пограничный слой при интенсивном прогреве подстилающей поверхности. БПЛА “Цимлянин” совершил три полета по идентичной траектории (рис. 2) в 10:10–10:20, 12:40–12:50 и 15:10–15:20 МСК. Траектория полетов представляла собой горизонтальные пролеты длиной порядка 1 км в направлении север–юг на высотах 30, 100 и 200 м

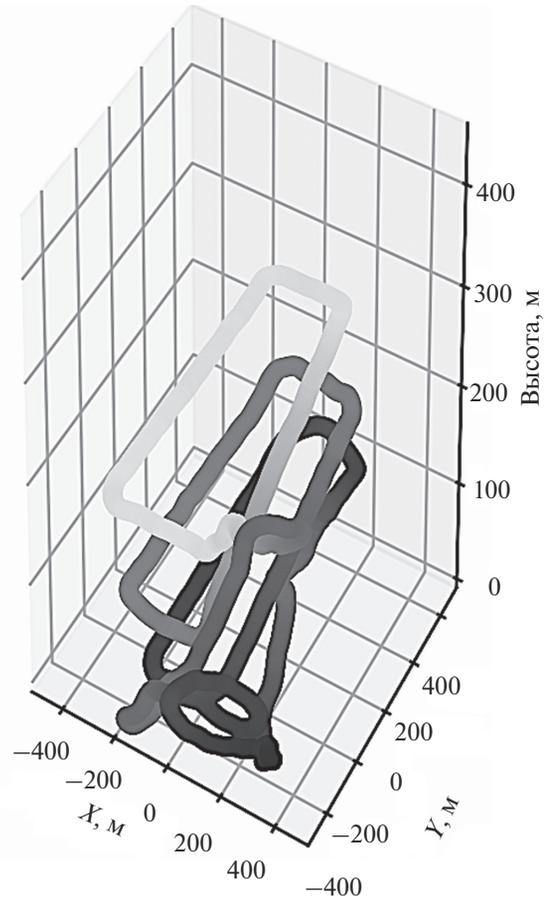
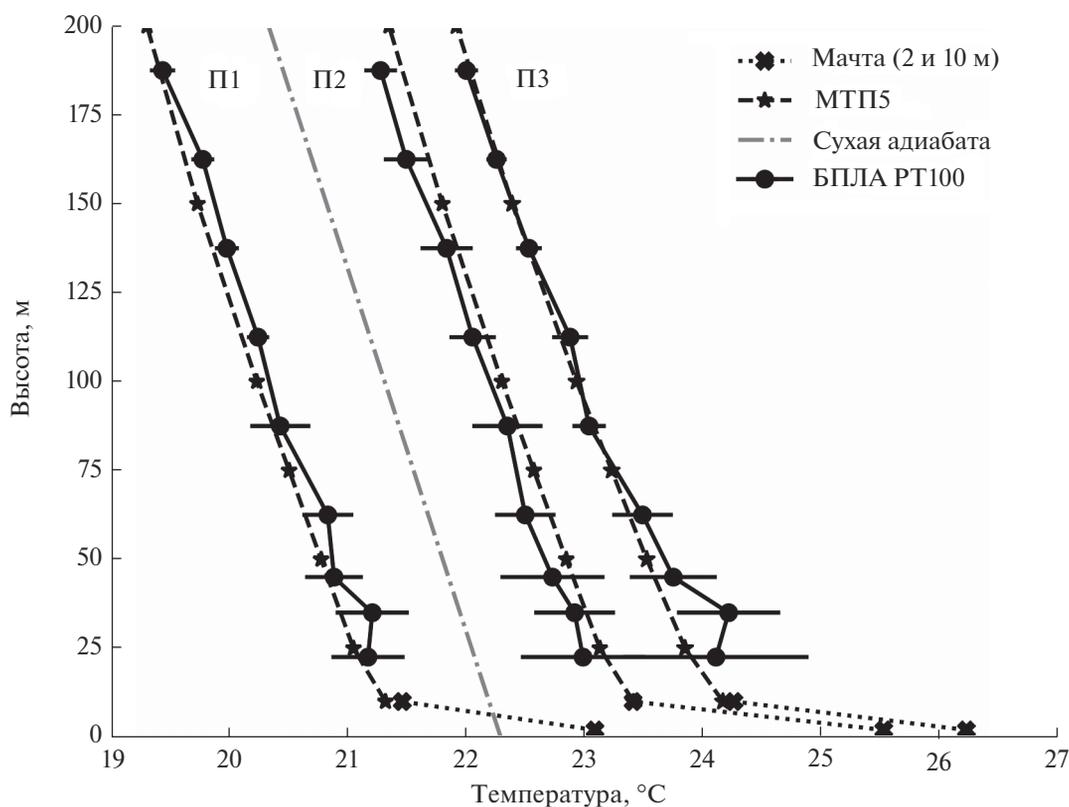


Рис. 2. Траектория полета 13 августа 2020 г. в 12:40–12:50 МСК. Цвет траектории соответствует высоте полета.

с наклонными участками набора высоты. Следует отметить, что для надежного сбора турбулентных статистик в развитом конвективном АПС необходимы измерения вдоль участков, превышающих высоту пограничного слоя хотя бы в несколько раз, что составило бы порядка 5 км. Подобные полеты не были проведены из соображений минимизации рисков на начальном этапе тестирования комплекса, но запланированы в будущем.

На рис. 3 приведены вертикальные профили температуры воздуха (П1, П2 и П3), полученные с помощью малоинерционного термометра сопротивления ЦАО, а также по данным микроволнового профилимера МТП-5 и измерениям автоматической метеостанции Aanderaa на высотах 2 и 10 м. Измерения БПЛА представлены медианными значениями температуры для заданных интервалов высот. Прежде всего, видно хорошее согласие измерений БПЛА с данными МТП-5 и автоматической метеостанции. Измеренные вертикальные профили отражают типичную структуру дневного конвективного пограничного слоя, а именно — квази-логарифмический профиль в приземном



**Рис. 3.** Вертикальные профили температуры воздуха согласно измерениям малоинерционного термометра сопротивления (РТ100) на борту БПЛА, данным профилимера МТП-5 и измерениям автоматической метеостанции Aanderaa. Горизонтальными чертами показана дисперсия температуры по измерениям БПЛА.

слое переходит в сухую адиабату выше. Также виден рост средней температуры в течение дня, что связано с суточным ходом, обусловленным дневным прогревом.

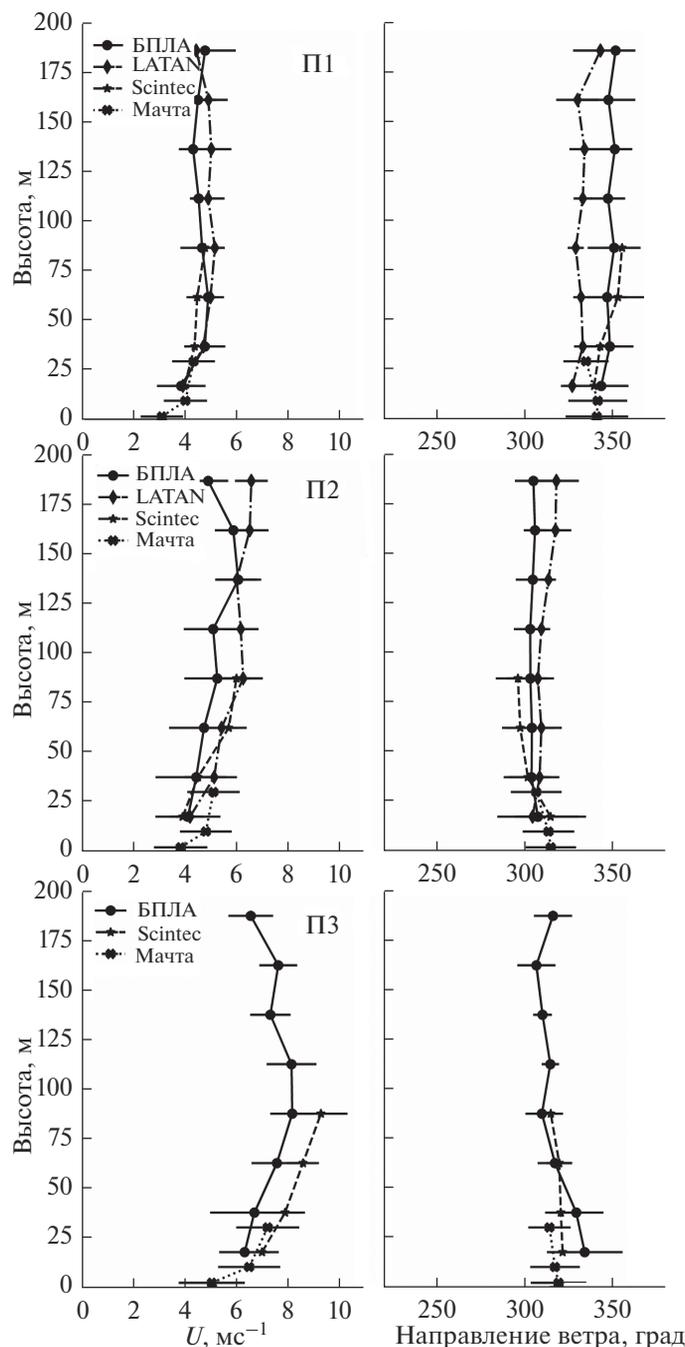
На рис. 4 приведены измеренные БПЛА профили скорости и направления ветра в сравнении с данными двух содаров и акустических анемометров, установленных на мачте на высотах 2, 10 и 30 м. На рисунке приведены медианные значения скорости и направления ветра, измеренные с помощью БПЛА, для заданных интервалов высот. Видно хорошее согласие как в отношении скорости, так и направления ветра между данными различных платформ. Как и в случае с температурой воздуха, скорость и направление ветра слабо меняются выше приземного слоя, что является следствием интенсивного перемешивания в пограничном слое.

Рисунок 5 демонстрирует вертикальный профиль дисперсии вертикальной скорости  $\overline{w'^2}$  по данным БПЛА и акустических анемометров. Интервал осреднения для данных акустического анемометра задавался равным 10 мин, что примерно соответствовало продолжительности полета. Как уже отмечалось, длина горизонтальных

участков полета была недостаточной для расчета турбулентных статистик. Поэтому представленные результаты могут дать лишь качественное представление о возможностях использования БПЛА для этой задачи. На рисунке видно, что в целом измерения с помощью БПЛА и акустических анемометров хорошо согласуются на высоте 30 м. Данные акустических анемометров также демонстрируют рост  $\overline{w'^2}$  с высотой, что характерно для нижней части конвективного пограничного слоя [23].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен новый БПЛА “Цимлянин” и его бортовой измерительный комплекс, разработанные для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя. БПЛА “Цимлянин” использует наиболее оптимальную гибридную схему, сочетающую преимущества вертикального взлета и посадки и горизонтального полета в самолетном режиме. В состав бортового измерительного комплекса входят специально разработанные для БПЛА “Цимлянин” измерительные приборы, такие как много-



**Рис. 4.** Вертикальные профили скорости и направления ветра по измерениям БПЛА “Цимлянин”, данным содаров Scintec и ЛАТАН, а также трех акустических анемометров, установленных на мачте на высотах 2, 10 и 30 м.

канальный приемник воздушных давлений и малоинерционный термометр сопротивления, прошедшие калибровку в аэродинамических трубах и климатической камере. Для измерительного комплекса также была разработана система опроса датчиков и записи показаний. Результаты тестовых полетов в Цимлянске в августе 2020 г. продемонстрировали хорошее согласие измеряемых с

помощью БПЛА вертикальных профилей средней температуры воздуха, скорости и направления ветра с данными других измерительных систем — автоматической метеостанции и акустических анемометров, микроволнового температурного профилимера и двух содаров. Измерения дисперсии вертикальной скорости также хорошо согласуются с данными акустических анемомет-

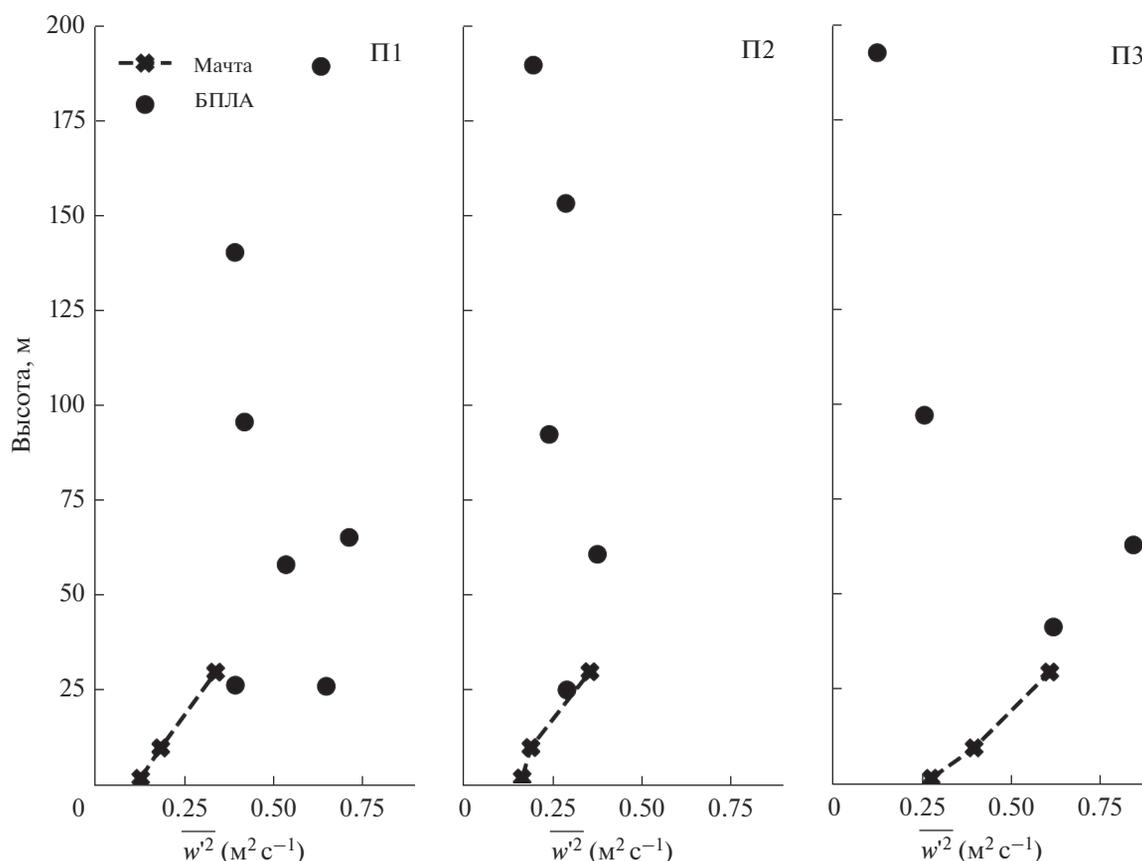


Рис. 5. Вертикальные профили дисперсии вертикальной скорости ветра по измерениям с помощью БПЛА “Цимлянин” и данным акустических анемометров, установленных на мачте на высоте 2, 10 и 30 м.

ров. Дальнейшая работа по апробации измерительного комплекса БПЛА “Цимлянин” будет заключаться в отработке методики измерения турбулентных статистик в атмосферном пограничном слое. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанные БПЛА “Цимлянин” и его бортовой измерительный комплекс удовлетворяют требованиям проведения измерений характеристик турбулентности в атмосферном пограничном слое, что позволяет в дальнейшем использовать его в качестве основного и вспомогательного измерительного средства для решения актуальных проблем метеорологии пограничного слоя.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Разработка БПЛА “Цимлянин” и его измерительного комплекса выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 18-77-10072); анализ данных измерений и написание алгоритмов обработки данных выполнены при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-17-00249). Проведение измерений с помощью содара ЛАТАН-3 и обработка полученных данных вы-

полнены за счет грантов РФФИ 19-05-01008 и РФФ 21-17-00021.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bou-Zeid E., Anderson W., Katul G.G. et al. The Persistent Challenge of Surface Heterogeneity in Boundary-Layer Meteorology: A Review // *Boundary-Layer Meteorol.* 2020. V. 177. P. 227–245.
2. Mahrt L., Bou-Zeid E. Non-stationary Boundary Layers // *Boundary-Layer Meteorol.* 2020. V. 177. P. 189–204.
3. Etling D., Brown R.A. Roll vortices in the planetary boundary layer: A review // *Boundary-Layer Meteorol.* 1993. V. 65. № 3. P. 215–248.
4. Mahrt L., Thomas C.K., Grachev A.A., Persson P.O.G. Near-Surface Vertical Flux Divergence in the Stable Boundary Layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2018. V. 169. P. 373–393.
5. Lothon, M. et al. The BLLAST field experiment: Boundary-Layer Late Afternoon and Sunset Turbulence // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 10931–10960.
6. Beyrich F., Leps J.P., Mauder M. et al. Area-Averaged Surface Fluxes Over the Litfass Region Based on Eddy-

- Covariance Measurements // *Boundary-Layer Meteorol.* 2006. V. 121. P. 33–65.
7. Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д. Воздействие внутренних гравитационных волн на флуктуации метеорологических параметров атмосферного пограничного слоя // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2018. Т. 54. № 2. С. 195–205.
  8. Банах В.А., Смалихо И.Н. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 304 с.
  9. Струнин М.А., Хияма Т. Самолетные исследования атмосферного пограничного слоя над долиной реки Лены в районе г. Якутска. Часть II. Спектральная структура // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2005. Т. 41. № 3. С. 378–398.
  10. Tetzlaff A., Lüpkes C., Hartmann J. Aircraft-based observations of atmospheric boundary-layer modification over Arctic leads // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. V. 141. P. 2839–2856.
  11. Elvidge A.D., Renfrew I.A., Weiss A.I., Brooks I.M., Lachlan-Cope T.A. and King, J.C. Observations of surface momentum exchange over the marginal ice zone and recommendations for its parametrization // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 1545–1563.
  12. Elston J., Argrow B., Stachura M., Weibel D., Lawrence D., Pope D. Overview of Small Fixed-Wing Unmanned Aircraft for Meteorological Sampling // *J. Atmospheric and Oceanic Technology.* 2015. V. 32. № 1. P. 97–115.
  13. Репина И.А., Варенцов М.И., Чечин Д.Г. и др. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // *Инноватика и экспертиза: научные труды.* 2020. Т. 2. № 30. С. 20–39.
  14. Kukharets V., Tsvang L. A Radio-Controlled Aircraft to Investigate Atmospheric Turbulence // *J. Atmospheric and Oceanic Technology.* 1998. V. 15(1). P. 215–218.
  15. Rautenberg A., Schön M., zum Berge K., Mauz M., Manz P., Platis A., van Kesteren B., Suomi I., Kral S.T., Bange J. The Multi-Purpose Airborne Sensor Carrier MASC-3 for Wind and Turbulence Measurements in the Atmospheric Boundary Layer. *Sensors* // 2019. V. 19. P. 2292
  16. Bärffuss K., Pätzold F., Altstädter B., Kathe E., Nowak S., Bretschneider L., Bestmann U., Lampert A. New Setup of the UAS ALADINA for Measuring Boundary Layer Properties, Atmospheric Particles and Solar Radiation // *Atmosphere.* 2018. V. 9. P. 28.
  17. 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. Atmospheric and Oceanic Technology.* 2013. V. 30(7). P. 1295–1319.
  18. Alaoui-Sosse S., Durand P., Medina P., Pastor P., Lathon M., Cernov I. OVLI-TA: An Unmanned Aerial System for Measuring Profiles and Turbulence in the Atmospheric Boundary Layer // *Sensors.* 2019. V. 19. P. 581.
  19. Thielicke W., Hübert W., Müller U., Eggert M., Wilhelm P. Towards accurate and practical drone-based wind measurements with an ultrasonic anemometer // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 1303–1318.
  20. Thomas R.M., Lehmann K., Nguyen H., Jackson D.L., Wolfe D., Ramanathan V. Measurement of turbulent water vapor fluxes using a lightweight unmanned aerial vehicle system // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 243–257.
  21. Shevchenko A.M., Shmakov A.S. Multi-hole pressure probes to wind tunnel experiments and air data systems // *AIP Conference Proceedings.* 2017. V. 1893. P. 030088.
  22. Rautenberg A., Graf M.S., Wildmann N., Platis A., Bange J. Reviewing Wind Measurement Approaches for Fixed-Wing Unmanned Aircraft // *Atmosphere.* 2018. V. 9. P. 422.
  23. Young G.S. Turbulence Structure of the Convective Boundary Layer. Part I. Variability of Normalized Turbulence Statistics // *J. Atmos. Sci.* 1988. V. 45(4). P. 719–726.

## Experience of Studying the Atmospheric Boundary-Layer Turbulent Structure Using an Unmanned Aerial Vehicle

D. G. Chechin<sup>1, \*</sup>, A. Yu. Artamonov<sup>1</sup>, N. E. Bodunkov<sup>2</sup>, D. N. Zhivoglotov<sup>3</sup>, D. V. Zaytseva<sup>1</sup>, M. Yu. Kalyagin<sup>2</sup>, D. D. Kouznetsov<sup>1</sup>, A. A. Kounashouk<sup>2</sup>, M. A. Shevchenko<sup>4</sup>, and A. A. Shestakova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,  
Pyzevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Volokolamskoye ave., 4, Moscow 125993 Russia

<sup>3</sup>Central Aerological Observatory, Pervomayskaya str., 3, Dolgoprudny, 141700 Russia

<sup>4</sup>Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,  
Institutskaya str., 4/1, Novosibirsk, 630090 Russia

\*e-mail: chechin@ifaran.ru

The growing relevance of the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for studying turbulence in the atmospheric boundary layer is associated with the need to obtain new observational data at different heights in the boundary layer, as well as over heterogeneous landscapes. Such new data is needed for developing turbulence models for spatially inhomogeneous and unsteady conditions. This paper describes a new UAV “Tsimlyanin” and its meteorological payload, developed specifically for the study of the turbulent struc-

ture of the atmospheric boundary layer. The UAV “Tsimlyanin” differs from similar vehicles by using a hybrid scheme, which combines the possibility of vertical take-off and landing and horizontal flight in airplane mode. The meteorological payload includes specially designed measuring devices, namely, a multi-hole air pressure probe and a low-inertia resistance thermometer. Also, the analog-to-digital converters for several sensors as well as the onboard data acquisition system were newly developed. The paper presents the results of measurements carried out using the UAV during test flights in Tsimlyansk in August 2020. A good agreement of the UAV observations with respect to vertical profiles of air temperature, wind speed and direction, dispersion of vertical speed with the data of observations of other complexes – acoustic anemometers, automatic meteorological station, sodars and a temperature profiler – was obtained. The obtained results demonstrate the high potential of the developed UAV for application to the problems of studying turbulence in the atmospheric boundary layer.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, atmospheric boundary layer, turbulence