

Верификация измерений температурного профиля атмосферы профилемером МТР-5 на основе использования беспилотного летательного аппарата

Н.П. Красненко^{1,2}, П.А. Карпушин², С.А. Кураков¹, Ю.Б. Попов², А.С. Раков¹

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

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40,
E-mail: krasnenko@imces.ru

Рассматриваются возможности измерения вертикальных профилей параметров атмосферы: температуры и влажности, с использованием беспилотных летательных аппаратов на базе мультироторных аэромобильных платформ. Проводится сравнение данных измерений с измерениями метеорологического температурного профилера МТР-5.

Ключевые слова: атмосфера, температурный профиль, температурный профилемер, мультикоптер, верификация измерений

Verification of the temperature profile of the atmosphere measured with an MTP-5 profilometer placed on board of an unmanned aerial vehicle

N.P. Krasnenko^{1,2}, P.A. Karpushin², S.A. Kurakov¹, Yu.B. Popov², A.S. Rakov¹

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS.

Possibilities of measuring vertical profiles of atmospheric parameters: temperature and humidity, using unmanned aerial vehicles based on multi-rotor airmobile platforms are considered. A comparison of the measurement data with the measurements of the meteorological temperature profiler MTP-5 is carried out.

Keywords: atmosphere, vertical profile of the temperature, temperature profiler, multicopter, comparison of the measurement

Введение

Информация о высотном профиле температуры и типе термической стратификации в нижнем - пограничном атмосферном слое необходима в исследованиях физики атмосферы, ряде практических приложений, таких, как распространение радио, и звуковых волн, оценка и прогнозирование загрязнения воздуха и др. Традиционно измерения профиля температуры, как и других метеорологических величин, обеспечиваются в стационарных условиях станциями аэрологического зондирования или метеорологическими датчиками на высотных метеорологических мачтах. Однако они не могут обеспечить достаточно высокое пространственное и временное разрешение измерений, необходимое для решения указанных выше задач в атмосферном пограничном слое (АПС).

В последние годы для определения профиля температуры в АПС в России и в мире стали широко использоваться приборы, реализующие методы дистанционной микроволновой радиометрии [1-6]. В частности, применяется метеорологический температурный профилемер МТР-5 [6], разработанный и изготавливаемый в России и получивший широкое применение на практике в атмосферных исследованиях. Среди

публикаций в этом направлении есть как работы, рассматривающие методические вопросы микроволновой радиометрии атмосферы и анализирующие возможности температурных профиломеров [5, 6], так и работы по исследованию изменчивости температурного режима пограничного слоя атмосферы в зависимости от внешних условий. В частности, с использованием МТР-5 были проведены измерения температуры на высотах пограничного слоя атмосферы в различных регионах России. Его измерения ранее сопоставлялись с радиозондовыми и содарными измерениями, измерениями на высотной метеомачте.

Также в последнее время в практических целях стали широко использоваться различного типа беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [7-9]. БПЛА (или иначе дроны) помимо выполнения традиционных задач по видео- и фотосъемке местности, могут выполнять геофизические и метеорологические задачи, в частности, измерения параметров состояния атмосферы [10-21]. Для решения задач в области метеорологии, в частности, для измерения вертикальных профилей метеопараметров, на наш взгляд, наиболее перспективным является применение БПЛА на базе мультироторных аэромобильных платформ (МАП или мультикоптеры). Данный вид БПЛА является универсальной несущей платформой с широким спектром применения. Высокая стабильность в полете, устойчивость к ветровым нагрузкам, наличие программируемых бортовых навигационных устройств - позволяют использовать данный тип БПЛА в широком диапазоне метеорологических условий, в любое время суток, в режиме ручного управления и автономного полета. В научных публикациях широко обсуждаются ближайшие перспективы использования БПЛА для решения метеорологических задач, их преимущества и недостатки.

В качестве одной из таких задач рассматривается использование метеорологических БПЛА для верификации данных дистанционного зондирования (ДЗ) [20, 21]. Оснащение МАП блоком измерительных метеодатчиков (БИМ), позволяет проводить контактные измерения вертикального профиля метеорологических параметров в атмосферном пограничном слое (АПС) при каждом подъеме и спуске аппарата. При этом высота измеренных профилей может достигать нескольких километров в зависимости от типа аппарата и погодных условий.

Актуальность этой задачи обусловлена ещё и тем, что данные средств дистанционного зондирования атмосферы всё более вовлекаются в процесс контроля и прогнозирования состояния атмосферы. Очевидно, что любые измерительные средства требуют проверки и калибровки, тем более средства дистанционного зондирования. С этой точки зрения, БПЛА является универсальным и очень мобильным аппаратом, который может быть полезен для получения данных о состоянии атмосферы. Комплектация БПЛА метеорологическими датчиками различного назначения позволяет обеспечить многоплановые измерения и быстро перенастраивать платформу под решение специфических задач. Развитие технологий зондирования с помощью метеорологических БПЛА позволяет не только получить значительный объем данных, но и решать задачи фундаментальных исследований атмосферы на качественно новом уровне.

Таким образом, для верификации данных средств ДЗ, а также калибровки измерительной аппаратуры, целесообразно использовать измерения, полученные контактными методами, с помощью метеостанции размещенной на МАП. Такие данные от МАП могут быть использованы как самостоятельно, в качестве альтернативы аэрологическим измерениям, так и в комплексе с ними. При этом возможно создание автономной стационарной или передвижной локальной сети, обеспечивающей с помощью нескольких МАП периодические контактные измерения параметров пограничного слоя атмосферы вдоль заданной трассы или над какой-то

территорией, что позволит осуществлять мониторинг и прогнозирование состояния атмосферы над выбранной территорией.

Средства и условия проведения измерений

Метеорологический температурный профилемер МТР-5 [6] использует пассивный метод приема приходящего теплового радиоизлучения атмосферы на частоте поглощения кислорода с разных угломестных направлений. Он определяет вертикальный профиль температуры воздуха до высоты 1 км, обрабатывая принимаемые сигналы по специальной программе. Профилемер МТР-5 утвержден как средство измерений, работает в диапазоне температур ± 40 °С. Погрешность измерений температурного профиля при адиабатической кривой составляет 0,3 °С до высоты 500 м и 0,4 °С на высотах от 500 до 1000 м, при наличии инверсий составляет 0,8 °С до высоты 500 м и 1,2 °С на высотах от 500 до 1000 м. Дискретность представления профиля температуры в диапазоне высот от 0 до 100 м не более 25 м, а в диапазоне высот от 100 до 1000 м не более 50 м. Временная дискретность представления данных составляет 5 мин. Профилемер МТР-5 располагался на крыше четырехэтажного здания ИМКЭС СО РАН (рис. 1) на высоте 18 м.

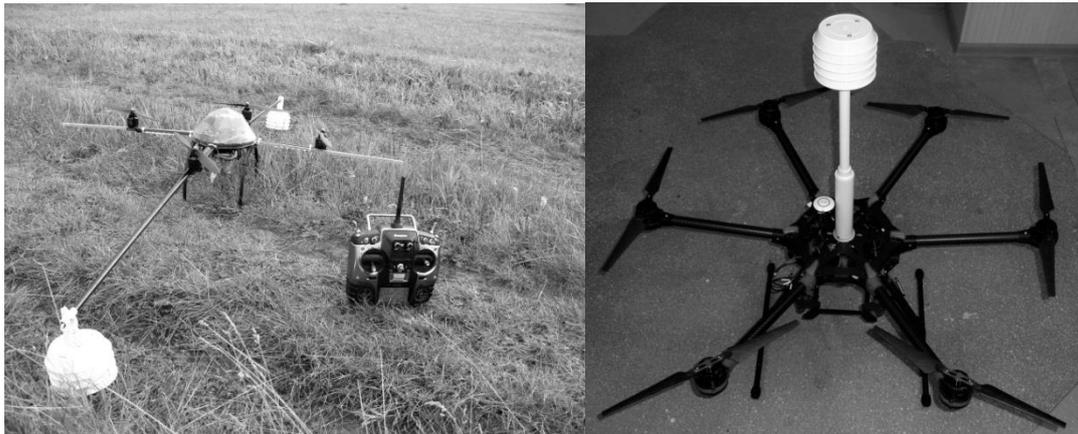


Рис. 1. На переднем плане профилемер МТР-5 и акустические локаторы, установленные на крыше ИМКЭС СО РАН, г.Томск

В ИМКЭС СО РАН разработано несколько типов портативных автоматических электронных метеостанций для квадрокоптера МК Quadro XL, гексакоптера DJI (модель S900) [14] и квадрокоптера Walkera Voyager 3 [20, 21] (Рис. 2 и 3). Были реализованы макеты беспилотных измерителей метеопараметров (БИМ) атмосферы: температуры, влажности, давления, а также проведены их испытания.

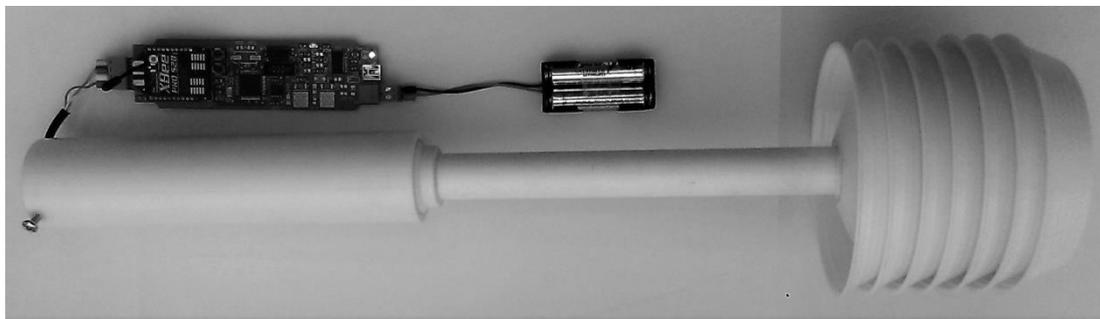
Таблица - Измеряемые метеопараметры

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Погрешность
Температура воздуха, °С	минус 70 ... плюс 55	$\pm 0,2$ при $T \leq 20^\circ\text{C}$ $\pm 0,3$ при $T > 20^\circ\text{C}$
Относительная влажность воздуха, %	5 ... 100	$\pm 2,5$ при $T > 0^\circ\text{C}$ ± 5 при $T < 0^\circ\text{C}$
Атмосферное давление, ГПа	500 ... 1100	$\pm 0,5$ разрешение 0,0025



а)

б)



в)



г)

д)

Рис. 2. БИМ на квадрокоптере МК Quadro XL на штангах длиной 0,7 м (а); на гексакоптере DJI (модель S900) на штоке высотой 0,5 м (б); шток с извлечёнными из корпуса платой измерительного блока и элементами питания (в); БИМ на квадрокоптере Walkera Voyager 3 на штоке высотой 40 см (г); шток с элементом крепления для него (д)

Метеостанции могут устанавливаться на различных типах мультикоптеров, удовлетворяющих требованиям по полетному весу, вертикальной и горизонтальной

скорости полета. В таблице приведены измеряемые метеорологические величины и их основные характеристики.

Верификация с профилемером МТР-5 проводилась с использованием квадрокоптера Walkera Voyager 3 (рис. 3). Запуск БПЛА осуществлялся с поверхности земли. Расстояние между измерителями составляло около 60 м. Полеты БПЛА осуществлялись до высоты 800 м.

Результаты исследований

Исследования проводились на протяжении продолжительного периода времени в различных метеоусловиях при слабых ветрах. Они продемонстрировали возможность измерений строго вертикальных профилей метеовеличин, в отличие от шар-зонда, траектория которого зависит от скорости ветра. МАП обеспечивала подъем с автоматическим удержанием аппарата над точкой старта по данным бортового приемника GPS. Вертикальное разрешение измерений зависит от скорости подъема и постоянной времени используемых датчиков. Во время экспериментальных полетов МАП вертикальное разрешение составило 10-15 м при скорости полета около 5 м/с. Достижимая высота измерений с помощью выбранных БПЛА составляет не менее 3 км. В среднем на каждый участок траектории полета (подъем и спуск) затрачивается до 15 минут полетного времени. Причем экспериментально было установлено, что спуск занимает больше времени, чем подъем.



Рис. 3. Макет беспилотного метеоизмерителя на базе квадрокоптера Walkera Voyager 3 в полете

По результатам синхронных экспериментов в 2019 и 2022 гг. были проведены сравнения измерений вертикального температурного профиля атмосферы с помощью БПЛА и температурного профилемера МТР-5 при различных стратификациях атмосферы.

На рис. 4,а,б,в приведены некоторые результаты сравнительного сопоставления измерений температуры при устойчивой стратификации атмосферы за 30.03.2019 г., 16.05.2019 г. и 20.05.2019 г. Как видно из графиков, кривые профилемера более гладкие и прямолинейные, что обусловлено меньшим пространственным и временным разрешением измерений. Каждый профиль температуры выдается профилемером с дискретностью 5 минут. Квадрокоптер выполняет измерения с периодичностью 1 сек. Поэтому графики его измерений профиля температуры показывают более тонкую структуру атмосферы. Во всех трех представленных результатах экспериментов наблюдаются различия в измерениях на малых высотах, примерно до 50 м. Здесь

БПЛА, в отличие от профилимера, фиксирует небольшую приземную инверсию. На рис. 4,а профилимер фиксирует мощную приподнятую инверсию температуры от высоты 170 м, а БПЛА только от высоты 200 м и с меньшим значением температуры и градиентом. На рис. 4,б БПЛА фиксирует тонкий слой приподнятой инверсии на высотах 290-320 м, а профилимер её не замечает. Также и на рис. 4,в БПЛА фиксирует наличие слоя приподнятой температурной инверсии на высотах 270-400 м, которая отсутствует на профилях температуры профилимера. С увеличением высоты данные по температуре значительно отличаются. При других стратификациях атмосферы кривые температурного профиля идут синхронно с высоким значением коэффициента корреляции. Измерения профиля влажности БПЛА отмечают повышенное наличие водного аэрозоля в слоях температурных инверсий (рис. 4,г,е).

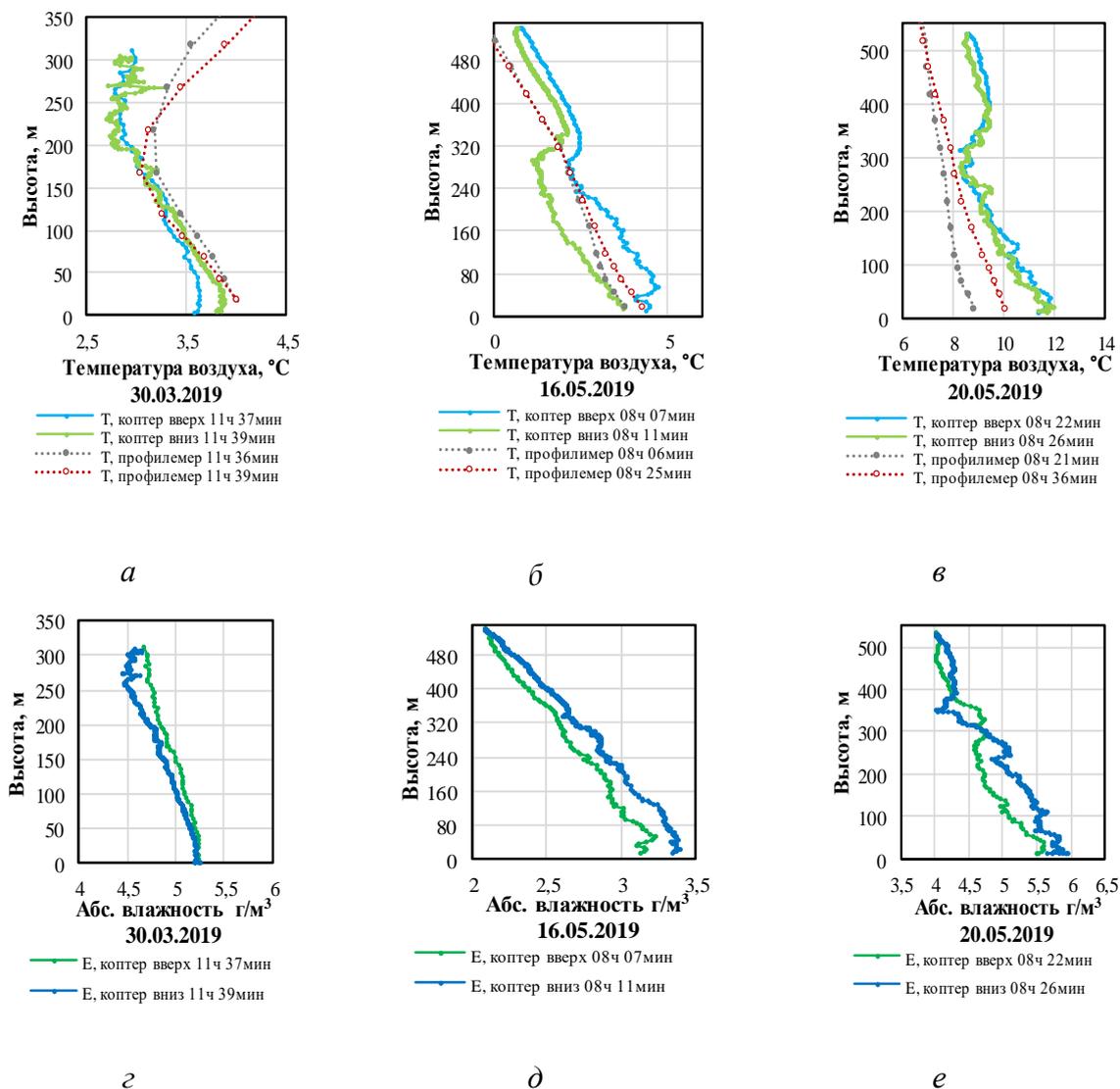


Рис. 4. Вертикальные профили температуры (°C) и абсолютной влажности (г/м³), полученные при полете БПЛА вверх и вниз, и измерения температуры профилимером МТР-5

В докладе приводятся также результаты синхронных измерений в другие дни с различным поведением температурных профилей. Проводится качественная и количественная оценка результатов верификации, измеренных температурных профилей.

Заключение

Проведенные разработки и натурные испытания показали, что метеокомплексы на мультикоптерах являются эффективным инструментом для измерения профилей основных метеорологических величин (температуры, влажности и атмосферного давления) в атмосферном пограничном слое. Вертикальное разрешение таких измерителей зависит от скорости подъема и постоянной времени используемых метеодатчиков (~1 с). Во время проведенных экспериментов оно составляло 10-15 м. Высота подъема или дальность полета зависит от типа используемого мультикоптера. Обычно до высоты около 3 км время подъема составит около 15 минут, на спуск требуется немного больше времени. Мультикоптер достаточно оперативно может быть запущен несколько раз по заданной трассе, что позволит отслеживать динамику измеряемых профилей метеовеличин. Для сокращения времени регистрации быстропротекающих процессов в атмосфере предлагается использовать одновременно нескольких микрокоптеров по схеме «воздушной этажерки». Результаты сравнения измерений вертикального профиля температуры с измерениями температурного профилемера МТР-5 позволяют рассматривать метеокомплекс на БПЛА как эффективное средство для верификации дистанционных методов зондирования атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН

Литература

1. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Lenskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin A.S. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments // J. Atmos. and Ocean. Technol. 1999. V. 16. N 7. P. 805-818.
2. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя-метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосферы и океана, 2009, т.22, № 7, с.697-704.
3. Кузнецова И.Н., Е.Н. Кадыгров, Е.А. Миллер, М.И. Нахаев. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосферы и океана, 2012, т. 25, № 10, с. 877-883.
4. Кадыгров Е.Н., Агапов Ю.В., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Точилкина Т.А., Троицкий А.В., Шапошников А.Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосферы и океана, 2013, т.26, № 6, с. 459-465.
5. Кадыгров Е.Н., Ганьшин Е.В., Миллер Е.А., Точилкина Т.А. Наземные микроволновые температурные профилемеры: потенциал и реальность. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 06. С. 521–528.
6. Кадыгров Е.Н., И.Н. Кузнецова. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профилемерами: теория и практика.- Долгопрудный, издательство «Физматкнига», 2015, с. 171.
7. Drones for Good in Smart Cities: A Review / A.C. Khan, B.A. Alvi, E.A. Safi, I.U. Khan // Proc. Int. Conf. on Electrical, Electronics, Computers, Communications, Mechanical and Computing (EECCMC) (India), 28th&29th January 2018 - 2018, p.7
8. Science, technology and the future of small autonomous drones/ D. Floreano. and R.J. Wood// Nature- 2015, vol 521, p 460

9. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use/ A.C. Watts, V.G. Ambrosia and E.A. Hinkley// *Remote Sensing* – 2012, vol 4 pp 1671-1692
10. Беспилотные технологии мониторинга погодных условий. / И.П. Расторгуев // *Гелиогеофизические исследования.* - 2014, № 8, С. 51-54
11. Simultaneous multicopter-based air sampling and sensing of meteorological variables / C. Brosy, K. Krampf, M. Zeeman, K. Schafer, S. Emeis, H. Kunstmann.// *Atmospheric Measurement Technique.* - 2017, vol 10, pp 2773-2784
12. The Use of Unmanned Aerial Vehicles for the Atmospheric Monitoring/ N.M. Sitnikov, D.V. Akmulin, Yu.A. Borisov et all. // *Метеорология и гидрология* – 2013, vol. 1 pp 90-99
13. An optimized multicopter UAV sounding technique (MUST) for probing comprehensive atmospheric variables/ Chin-Chung Chang, Chin-Yuan Chang, Jia-Lin Wang et all.// *Chemosphere* – 2020, vol. 254, Art. 126867
14. Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы. / С. А. Кураков, В. В. Зуев, // *Оптика атмосферы и океана.* – 2016, т. 29, №11–с. 994-999
15. Bell T., Greene B., Klein P., Carney M., & Chilson P. (2019). Confronting the Boundary Layer Data Gap: Evaluating New and Existing Methodologies of Probing the Lower Atmosphere. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, (December), 1–23
16. Kral S., Reuder J., Vihma T., Suomi I., O'Connor E., Kouznetsov R., Wrenger B., Rautenberg A., Urbancic G., Jonassen M., Båserud L., Maronga B., Mayer S., Lorenz T., Holtslag A., Steeneveld G.-J., Seidl A., Müller M., Lindenberg C., Langohr C., Voss H., Bange J., Hundhausen M., Hilsheimer P., & Schygulla M. (2018). Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR)—The Hailuoto 2017 Campaign. *Atmosphere*, 9(7), 268
17. Segales A. R., Greene B. R., Bell T. M., Doyle W., Martin J. J., Pillar-Little E. A., & Chilson P. B. (2020). The CopterSonde: an insight into the development of a smart unmanned aircraft system for atmospheric boundary layer research. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(5), 2833–2848
18. 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*, 231, 012053
19. Varentsov M., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Bogomolov V., Kuksova N., Marchuk E., Pashkin A., & Varentsov A. (2021). Balloons and Quadcopters: Intercomparison of Two Low-Cost Wind Profiling Methods. *Atmosphere*, 12(3), 380
20. Красненко Н.П., Попов Ю.Б., Карпушин П.А., Кураков С.А., Раков А.С. Использование метеорологических беспилотных летательных комплексов мультироторного типа для верификации радиометрических измерений температурного профиля атмосферы // *Шарыгинские чтения. Вторая международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации*, г. Томск: материалы конференции. – Томск: Изд-во Томск. Гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. С. 69-76.
21. Popov Yu.B., Karpushin P.A., Krasnenko N.P., Kurakov S.A., Popova K.Yu., Rakov A.S. Meteorological multi-rotor unmanned aerial complex and its application for monitoring of the atmosphere. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1040** (2022) 0122006; doi: 10.1088/1755-1315/1040/1/012006.