

УДК 551.51;504.35

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БПЛА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В АТМОСФЕРЕ¹

© 2021 г. А. П. Шелехов^а, *, А. Л. Афанасьев^б, Е. А. Шелехова^а, А. А. Кобзев^а,
А. Е. Тельминов^а, А. Н. Молчунов^а, О. Н. Поппевина^а

^аИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
просп. Академический, 10/3, Томск, 634055 Россия

^бИнститут оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, площадь Академика Зуева, 1, Томск, 634055 Россия
*e-mail: ash1404@mail.ru

Поступила в редакцию 17.05.2021 г.

После доработки 28.05.2021 г.

Принята к публикации 09.06.2021 г.

В работе показана возможность использования телеметрии малоразмерных БПЛА для контроля над состоянием атмосферной турбулентности. Спектр турбулентности определялся из данных углов крена, тангажа и рысканья квадрокоптера *DJI Mavic Mini* и сравнивался с результатами измерений автономного метеорологического комплекса АМК-03. Измерения осуществлялись на Базовом экспериментальном комплексе ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН (БЭК) 24 июля и 12 августа 2020 г., поверхность территории которого близка к ровной и однородной. Установлено, что спектры турбулентности, полученные с помощью АМК-03 и *DJI Mavic Mini*, в целом совпадают, а незначительные различия наблюдаются в высокочастотной области спектра, начиная с $f \sim 1$ Hz. Для данных, полученных в июле, спектры турбулентности в инерционном диапазоне подчиняются закону “пяти третей”, а отношения измеренных спектров турбулентности поперечной и продольной компонент скорости соответствуют изотропной турбулентности Колмогорова–Обухова. В случае измерений, выполненных в августе, наблюдалось незначительное отклонение от закона “пяти третей”, что фиксировалось как на основании измерений, полученных с помощью АМК-03, так и *DJI Mavic Mini*. Для оценки продольных и поперечных масштабов турбулентности применялся метод наименьших квадратов, в качестве кривой регрессии использовалась модель Кармана. Масштабы турбулентности, рассчитанные по июльским и августовским данным АМК-03 и *DJI Mavic Mini*, совпадают, также с хорошей точностью выполняется условие, которое описывает связь между продольными и поперечными масштабами в изотропной атмосфере.

Ключевые слова: БПЛА, низковисотное зондирование, атмосферная турбулентность, спектр, масштабы турбулентности

DOI: 10.31857/S0002351521050138

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферная турбулентность, которая проявляется в беспорядочных пульсациях скорости течения воздуха как во времени, так и в пространстве, оказывает сильное, а иногда и катастрофическое воздействие на летательные аппараты. Данное воздействие существенным образом зависит от размеров и массы летательных аппаратов. В сравнении с самолетами и вертолетами размеры и масса беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) могут быть значительно меньше, что приводит к более сильному влиянию турбулент-

ности на летательный аппарат. Также БПЛА могут летать на значительно меньших высотах, чем пилотируемые аппараты. На малых высотах подстилающая поверхность оказывает дополнительное воздействие на состояние атмосферной турбулентности, которое проявляется в появлении дополнительных турбулентных вихрей. Таким образом, турбулентная атмосфера в большей степени усложняет движение БПЛА, а наличие зданий, сложной орографии в городе дополнительно ухудшает навигацию в среде с беспорядочными пульсациями скорости ветра. Одной из актуальных проблем навигации в турбулентной атмосфере является мониторинг и прогноз состояния турбулентных вихревых образований, возникающих при транспортировке груза с помощью БПЛА в “умном городе” в диапазоне высот до 500 м [1].

¹ 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.).

Известно [2], что для описания состояния БПЛА кроме знания скорости движения аппарата относительно воздушной массы необходима информация о спектре турбулентности на пути его следования в турбулентной атмосфере. Результаты экспериментальных исследований показывают, что хорошим приближением для описания состояния БПЛА является подход, основанный на пропускании белого шума через линейный фильтр, задаваемый спектром турбулентности Кармана. Кроме спектра Кармана подходящим приближением в задачах динамики БПЛА в турбулентной атмосфере является модель турбулентности Драйдена [2], также могут использоваться другие модели, например, унифицированная модель турбулентности [3]. Таким образом, мониторинг и прогноз состояния вихревых образований сводится к определению спектра турбулентности на пути следования БПЛА в “умном городе”.

К числу эффективных средств дистанционного зондирования турбулентной атмосферы относятся содары, лидары и радары, а среди контактных методов мониторинга наиболее популярными являются акустические анемометры. В последние годы малоразмерные БПЛА стали также популярным инструментом в области мониторинга атмосферы. Наиболее актуальной проблемой в этой области является применение БПЛА при низковысотном зондировании атмосферы в труднодоступных местах и на территории со сложной орографией, такие как арктический регион, городская среда, горная местность. В работе [4, 5] рассмотрены различные аспекты использования БПЛА для исследования атмосферного пограничного слоя и перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в метеорологии и физике атмосферы.

Основной тенденцией в этой области является диагностика скорости перемещения потока воздушных масс [6–10]. Кроме скорости ветра интерес представляет исследование флуктуационных характеристик турбулентной атмосферы. В начале низковысотное зондирование флуктуационных характеристик турбулентной атмосферы осуществлялось с использованием БПЛА с неподвижным крылом [11–16]. В этих работах показана принципиальная возможность измерения спектров турбулентности с использованием БПЛА с неподвижным крылом различных размеров и веса. В процессе зондирования БПЛА такого типа движется в пространстве продолжительное время для того, чтобы получить репрезентативный ряд наблюдений флуктуаций скорости ветра. В результате такой схемы зондирования возникает неопределенность в пространстве при измерениях спектра турбулентности. Исключить такого рода неопределенность можно, используя БПЛА мультикоптерного типа, которые в состоянии зависать в фиксированной точке пространства в течение продолжительного времени.

В работах [17–19] показано, что применение квадрокоптера в режиме удержания высоты позволяет получить ход спектра турбулентности, который совпадает с измерениями, полученными с помощью акустической анемометрии. Такое совпадение говорит о том, что квадрокоптер можно использовать для изучения спектра турбулентности и его характеристик, например, энергетического и инерционного диапазонов, интегрального масштаба турбулентности и, следовательно, использовать дрон для мониторинга и прогноза состояния турбулентной атмосферы при транспортировке груза с помощью БПЛА в “умном городе”.

В настоящей работе представлены результаты измерения спектров турбулентности и интегральных масштабов, полученных с помощью квадрокоптера *DJI Mavic Mini* и автоматизированного метеорологического комплекса АМК-03. Экспериментальные исследования проводились на Базовом экспериментальном комплексе ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН (БЭК), поверхность территории которого близка к ровной и однородной.

1. ПРОДОЛЬНЫЙ И ПОПЕРЕЧНЫЙ СПЕКТР ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В системе координат, в которой одна из осей направлена по средней скорости ветра, поле скоростей турбулентного потока воздуха имеет вид [20, 21]:

$$u(r, 0, 0; t) = \langle u \rangle + u'(r, 0, 0; t), \quad (1)$$

$$v = v'(r, 0, 0; t), \quad (2)$$

$$w = w'(r, 0, 0; t), \quad (3)$$

где $\langle u \rangle$ – средняя скорость ветра, u' , v' и w' – флуктуации скорости ветра воздуха, $\langle \dots \rangle$ – оператор статистического усреднения.

Главным преимуществом системы координат, в которой одна из осей направлена по направлению средней скорости ветра, является возможность использования гипотезы Тейлора о “замороженности” турбулентных флуктуаций [20, 21]. Суть данной гипотезы сводится к тому, что вся пространственная турбулентная картина движется во времени со средней скоростью ветра $\langle u \rangle$. В результате мы получаем простую теоретическую связь между пространственно-временными и чисто пространственными характеристиками флуктуаций поля скорости ветра,

$$u'(r, 0, 0; t) = u'(r - \langle u \rangle t, 0, 0), \quad (4)$$

$$v'(r, 0, 0; t) = v'(r - \langle u \rangle t, 0, 0), \quad (5)$$

$$w'(r, 0, 0; t) = w'(r - \langle u \rangle t, 0, 0), \quad (6)$$

что позволяет нам сравнивать поведение временных спектров, измеренных экспериментально, с теоретическими результатами.

Одной из наиболее часто используемых моделей спектров турбулентности является модель Кармана [3, 20, 21], которая позволяет исследовать поведение спектра в энергетическом и инерционном диапазонах. Выражения для продольных и поперечных временных спектров турбулентности для модели Кармана имеют вид

$$\frac{\Phi_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{2L_u}{\pi} \frac{1}{\left[1 + (1.339L_u 2\pi f / \langle u \rangle)^2\right]^{5/6}}, \quad (7)$$

$$\frac{\Phi_v(f)}{\sigma_v^2} = \frac{2L_v}{\pi} \frac{1 + 8/3(2.678L_v 2\pi f / \langle w \rangle)^2}{\left[1 + (2.678L_v 2\pi f / \langle u \rangle)^2\right]^{11/6}}, \quad (8)$$

где L_u – продольный масштаб турбулентности и L_v – поперечный масштаб турбулентности, σ_u^2 и σ_v^2 – дисперсии продольной и поперечной компонент скорости ветра. В случае изотропной атмосферы имеем следующее выражение для этих масштабов

$$L_v = L_u/2. \quad (9)$$

В инерционном диапазоне для изотропной турбулентности спектр турбулентности продольных и поперечных флуктуаций скорости подчиняется закону “пяти третей” Колмогорова–Обухова [3, 20, 21]

$$\frac{\Phi_u(f)}{\sigma_u^2} \sim f^{-5/3}, \quad (10)$$

$$\frac{\Phi_v(f)}{\sigma_v^2} \sim f^{-5/3}, \quad (11)$$

а связь между спектрами турбулентности продольных и поперечных флуктуаций скорости имеет вид

$$\frac{4}{3} \frac{\Phi_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{\Phi_v(f)}{\sigma_v^2}. \quad (12)$$

2. ПРОДОЛЬНЫЕ И ПОПЕРЕЧНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ

На рис. 1а схематически показаны расположение приборов и направление средней скорости ветра во время проведения экспериментов. Видно, что при проведении измерений использование системы координат, в которой одна из осей направлена по средней скорости ветра, сопряжено со значительными трудностями. Для корректного сравнения экспериментальных данных с теоретическими результатами используется подход, который исключает точное позиционирование приборов по направлению среднего ветра.

Хорошо известно, что в атмосфере часто наблюдается случай преобладания горизонтального переноса воздушных масс над вертикальным движением, поэтому одну из осей системы координат, рассмотренной в предыдущем разделе, направим по среднему горизонтальному ветру. При проведении измерений автоматизированный метеорологический комплекс АМК-03 был ориентирован по сторонам света, а квадрокоптер – произвольно. В этом случае продольные и поперечные турбулентные флуктуации скорости ветра примут вид

$$u' = n_E w'_E + n_N w'_N, \quad (13)$$

$$v' = -n_N w'_E + n_E w'_N, \quad (14)$$

$$\mathbf{n} = \{n_E, n_N, 0\} = \left\{ \frac{\langle w_E \rangle}{\langle u \rangle}, \frac{\langle w_N \rangle}{\langle u \rangle}, 0 \right\} \quad (15)$$

для АМК-03 и

$$u' = n_x w'_x + n_y w'_y, \quad (16)$$

$$v' = -n_x w'_y + n_y w'_x, \quad (17)$$

$$\mathbf{n} = \{n_x, n_y, 0\} = \left\{ \frac{\langle w_x \rangle}{\langle u \rangle}, \frac{\langle w_y \rangle}{\langle u \rangle}, 0 \right\} \quad (18)$$

для квадрокоптера. Здесь w'_E и w'_N – флуктуации компонент скорости ветра по осям E и N по данным АМК-03, w'_x и w'_y – оценки флуктуаций компонент скорости ветра, полученные на основе результатов телеметрии квадрокоптера; $\langle w_E \rangle$ и $\langle w_N \rangle$ – средние компоненты горизонтальной скорости по осям E и N ; $\langle w_x \rangle$ и $\langle w_y \rangle$ – оценки компонент скорости по осям x и y .

3. ОЦЕНКИ КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ ВЕТРА

В турбулентной атмосфере углы крена, тангажа и рысканья представляют собой сумму средних и флуктуационных компонент: $\phi = \langle \phi \rangle + \phi'$, $\theta = \langle \theta \rangle + \theta'$ и $\psi = \langle \psi \rangle + \psi'$. В работах [17–19] показано, что для идеального парения уравнения оценки компонент скорости ветра, полученные на основе результатов телеметрии квадрокоптера, можно записать в виде суммы регулярной и флуктуационной частей

$$w_x = -\frac{mg}{c_x} (\langle \phi \rangle s_{(\psi)} + \langle \theta \rangle c_{(\psi)}) - \frac{mg}{c_x} (\phi' s_{(\psi)} + \theta' c_{(\psi)}), \quad (19)$$

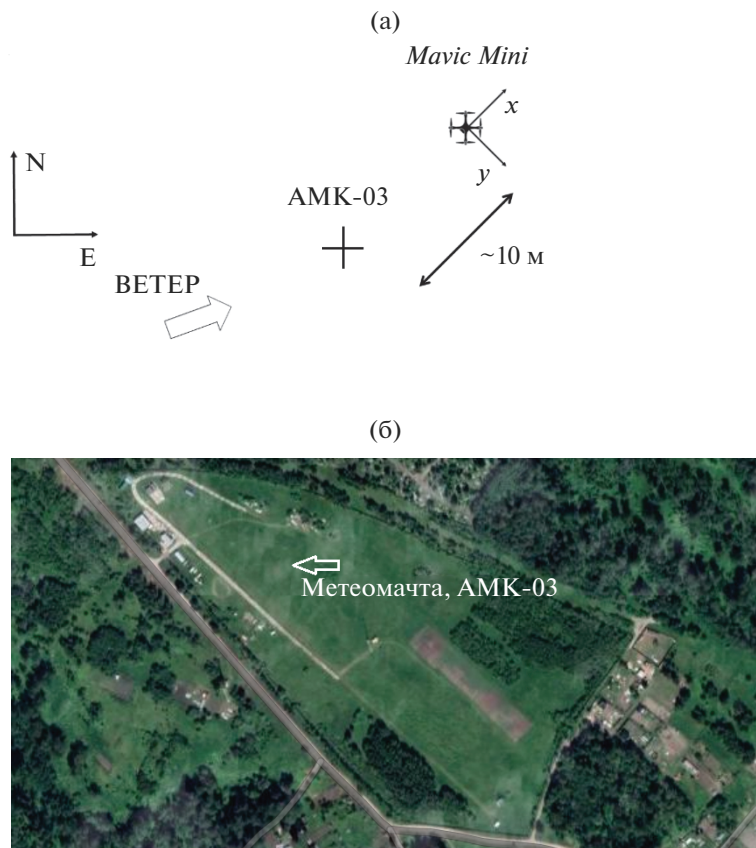


Рис. 1. Схема эксперимента (а); и Google карта местности Базового экспериментального комплекса ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН (б).

$$w_y = -\frac{mg}{c_y} (-\langle\varphi\rangle c_{\langle\psi\rangle} + \langle\theta\rangle s_{\langle\psi\rangle}) - \frac{mg}{c_y} (-\varphi' c_{\langle\psi\rangle} + \theta' s_{\langle\psi\rangle}) \quad (20)$$

в линейном случае и

$$w_x = -\text{sgn}(\langle\varphi\rangle s_{\langle\psi\rangle} + \langle\theta\rangle c_{\langle\psi\rangle}) \times \sqrt{\frac{2mg}{\rho C_x A_x}} |(\langle\varphi\rangle s_{\langle\psi\rangle} + \langle\theta\rangle c_{\langle\psi\rangle})| \times \left\{ 1 + \frac{\varphi' s_{\langle\psi\rangle} + \theta' c_{\langle\psi\rangle}}{2(\langle\varphi\rangle s_{\langle\psi\rangle} + \langle\theta\rangle c_{\langle\psi\rangle})} \right\}, \quad (21)$$

$$w_y = -\text{sgn}(-\langle\varphi\rangle c_{\langle\psi\rangle} + \langle\theta\rangle s_{\langle\psi\rangle}) \times \sqrt{\frac{2mg}{\rho C_x A_x}} |(-\langle\varphi\rangle c_{\langle\psi\rangle} + \langle\theta\rangle s_{\langle\psi\rangle})| \times \left\{ 1 + \frac{-\varphi' c_{\langle\psi\rangle} + \theta' s_{\langle\psi\rangle}}{2(-\langle\varphi\rangle c_{\langle\psi\rangle} + \langle\theta\rangle s_{\langle\psi\rangle})} \right\} \quad (22)$$

в квадратичном случае. Здесь c_j и C_j – коэффициенты сопротивления по осям x и y , m – масса квадрокоптера, g – ускорение свободного падения, ρ – плотности воздуха, A_j – проекции пло-

щади квадрокоптера по осям x и y , $\text{sgn}(\bullet)$ – функция знака.

Из выражений (19)–(22) видно, что оценки флуктуаций компонент скорости ветра прямо пропорциональны флуктуациям углов крена, тангажа. Следовательно, данные телеметрии квадрокоптера можно использовать для измерения оценки флуктуаций компонент скорости ветра, а формулы (16)–(18) позволяют нам рассчитать спектр турбулентности. Формулы (13)–(15) можно использовать для вычисления спектров турбулентности по данным АМК-03, которые являются объективной информацией о состоянии атмосферной турбулентности. В результате этих расчетов можно провести сравнение спектров турбулентности по данным АМК-03 и по данным телеметрии квадрокоптера.

4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Экспериментальные исследования проводились на Базовом экспериментальном комплексе ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН (БЭК) 24 июля 2020 г. и 12 августа 2020 г. На рис. 16 показана Google карта местности БЭК, стрелкой показано месторасположение метеомачты, на которой установ-

лены две АМК-03 на разных высотах. Местность, на которой расположен БЭК, не является в строгом понимании ровной и однородной поверхностью. Поверхность земли имеет незначительный уклон; с одной стороны, он граничит с коттеджным поселком, а на границе другой стороны расположен лес. При проведении экспериментов на такой территории возможны отклонения от изотропной турбулентности. В июньском эксперименте время начала исследований 05:01 UTC, а время их окончания 05:24 UTC, а в измерениях в августе полеты осуществлялись с 06:44 UTC по 07:07 UTC. Точка старта квадрокоптера *DJI Mavic Mini* находилась в непосредственной близости от тридцатиметровой метеомачты.

На рис. 2 показаны траектории полетов квадрокоптера во время проведения экспериментов. После взлета БПЛА поднимался на высоты 10 и 27 м, соответственно для 24 июля и 12 августа, и подлетал к АМК-03 [22, 23], расположенным на мачте. Квадрокоптер находился в режиме удержания высоты вблизи АМК-03 более 20 мин, после чего вернулся на точку старта. Данные о ветре фиксировались АМК-03 с частотой 80 Гц, а регистрация данных состояния квадрокоптера осуществлялась с частотой 10 Гц.

По данным Международного аэропорта Томска который находится на расстоянии ~10 км от БЭК, во время проведения эксперимента 24 июля 2020 г. наблюдались хорошие погодные условия с точки зрения полета квадрокоптера: ветер юго-западный, скорость 1.0 м/с, температура воздуха 21°C, влажность воздуха 51%, осадки не наблюдались. В другой день, т.е. 12 августа, фиксировались также хорошие погодные условия: ветер юго-юго-западный, скорость 4–5 м/с, температура воздуха 28°C, влажность воздуха 48%, осадки также не наблюдались. Во время проведения эксперимента 24 июля по данным АМК-03 на территории БЭК средняя скорость ветра на высоте 10 м равна 1.25 м/с, а 12 августа высоте 27 м – 2.6 м/с, временами скорость ветра усиливалась до 5 м/с и более.

На рис. 3 показаны изменения компонент скорости квадрокоптера относительно Земли по осям x , y , и z во время парения; 24.07.2020 (а) и 12.08.2020 (б). Видно, что в целом при проведении измерений компоненты скорости квадрокоптера равны нулю. В незначительные периоды времени силы, действующие на БПЛА, превосходят возможности системы управления и высокоточное позиционирование нарушается. После восстановления управления квадрокоптер начинает двигаться в первоначальное положение, при достижении которого он останавливается. Таким образом, периодами, при которых нарушается позиционирование квадрокоптера в пространстве, можно пренебречь в силу их незначительности и

считать, что во время проведения экспериментов наблюдалось идеальное парение.

Рассмотрим поведение оценок продольной и поперечной компонент скорости ветра по данным квадрокоптера в режиме удержания высоты в турбулентной атмосфере и сравним с результатами измерений, полученных с помощью АМК-03. Для визуального сопоставления измерений продольной и поперечной компонент скорости ветра, которые получены двумя способами, нами использовался феноменологический подход, основанный на экспериментальной связи между этими компонентами и углами крена, тангажа и рысканья. Данный подход позволяет нам избежать точного определения коэффициентов сопротивления и площади, которые сложно определить в эксперименте. Основные формулы используемого подхода и значения коэффициентов, полученных феноменологическим путем, представлены в Приложении. Отметим, что этот подход применяется нами только для визуального сопоставления измерений продольной и поперечной компонент скорости ветра, которые получены с помощью АМК-03 и *DJI Mavic Mini*. При исследовании относительных спектров турбулентности и определении масштабов турбулентности проводить процедуру, изложенную в Приложении, не обязательно.

На рис. 4 представлены результаты временных изменений продольных и поперечных компонент скорости ветра, измеренные с помощью АМК-03 (красные кривые) и *DJI Mavic Mini* (черные кривые); 24.07.2020 г. (а) и 12.08.2020 г. (б). Из рис. 4 следует, что временные ряды u и v , измеренные различными способами, совпадают; а различия наблюдаются в высокочастотной области флуктуаций.

На рис. 5 и 6 показаны результаты расчетов относительных спектров турбулентности, полученных на основе данных автоматизированного метеорологического комплекса АМК-03 (рис. 5а, 5б и 6а, 6б) и квадрокоптера *DJI Mavic Mini* (рис. 5в, 5г и 6в, 6г), σ^2 – коэффициент нормировки. На рисунках красной и синей кривыми обозначены спектры турбулентности продольной компоненты скорости, розовой и фиолетовой кривыми показаны спектры турбулентности поперечной компоненты скорости соответственно. Видно, что значения спектров существенным образом меняются при незначительных изменениях частоты. Данные изменения являются случайными осцилляциями около основных закономерностей спектров турбулентности. Для того, чтобы в явном виде увидеть эти закономерности спектров турбулентности, использовалась процедура сглаживания. Результаты применения процедуры сглаживания показаны на рис. 5 и 6 непрерывными черными кривыми.

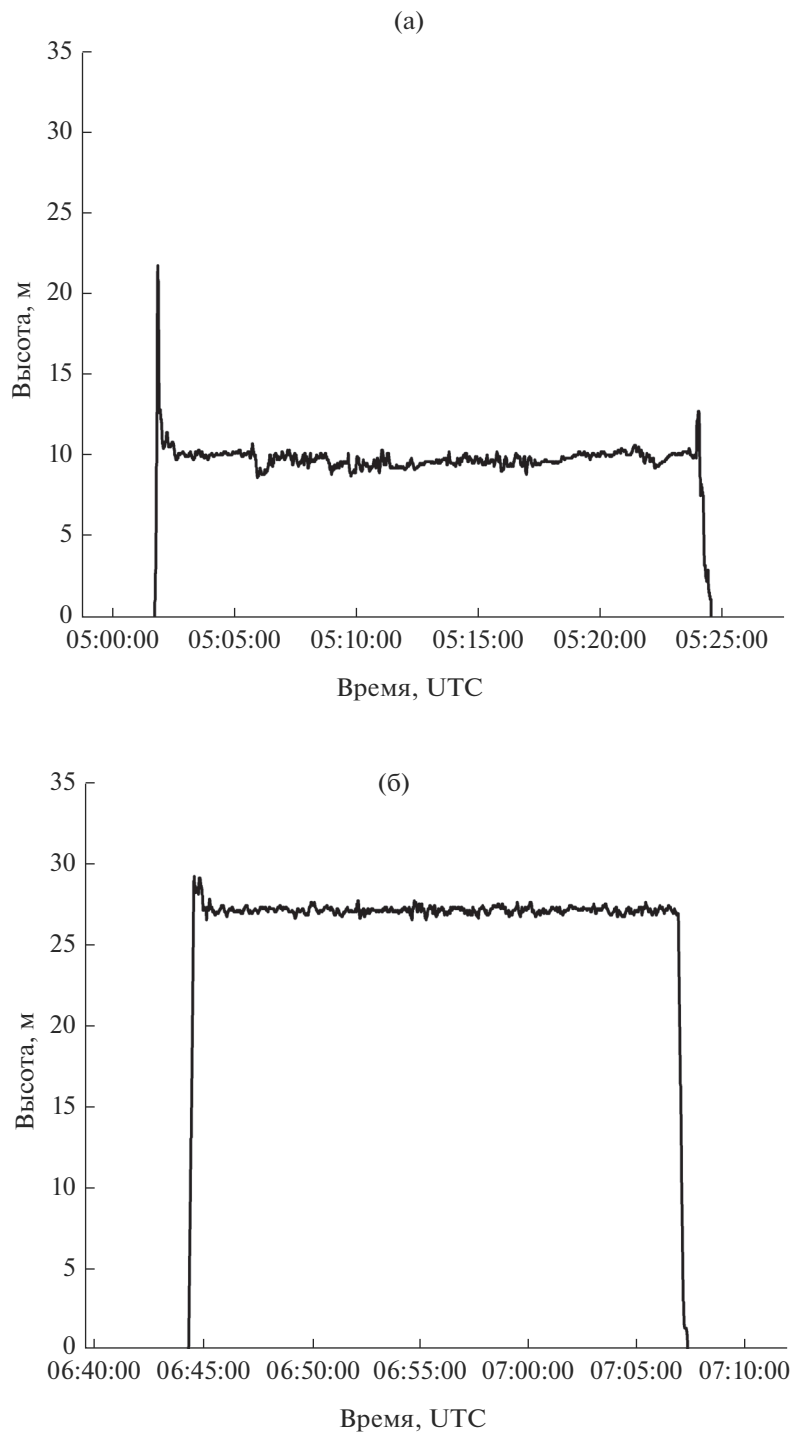


Рис. 2. Траектория полета квадрокоптера *DJI Mavic Mini* во время проведения эксперимента; 24.07.2020 г. (а) и 12.08.2020 г. (б)

Из рис. 5 и 6 видно, что спектры турбулентности, полученные с помощью АМК-03 и *DJI Mavic Mini*, в целом совпадают, а незначительные различия наблюдаются в высокочастотной области спектра, начиная с $f \sim 1$ Hz. В высокочастотной области спектр турбулентности для *DJI Mavic*

Mini затухает с ростом частоты незначительно, но быстрее, чем в случае данных, полученных с помощью АМК-03.

Хорошо известно [20, 21], что спектр турбулентности имеет три основные спектральные области — это энергетический диапазон, который

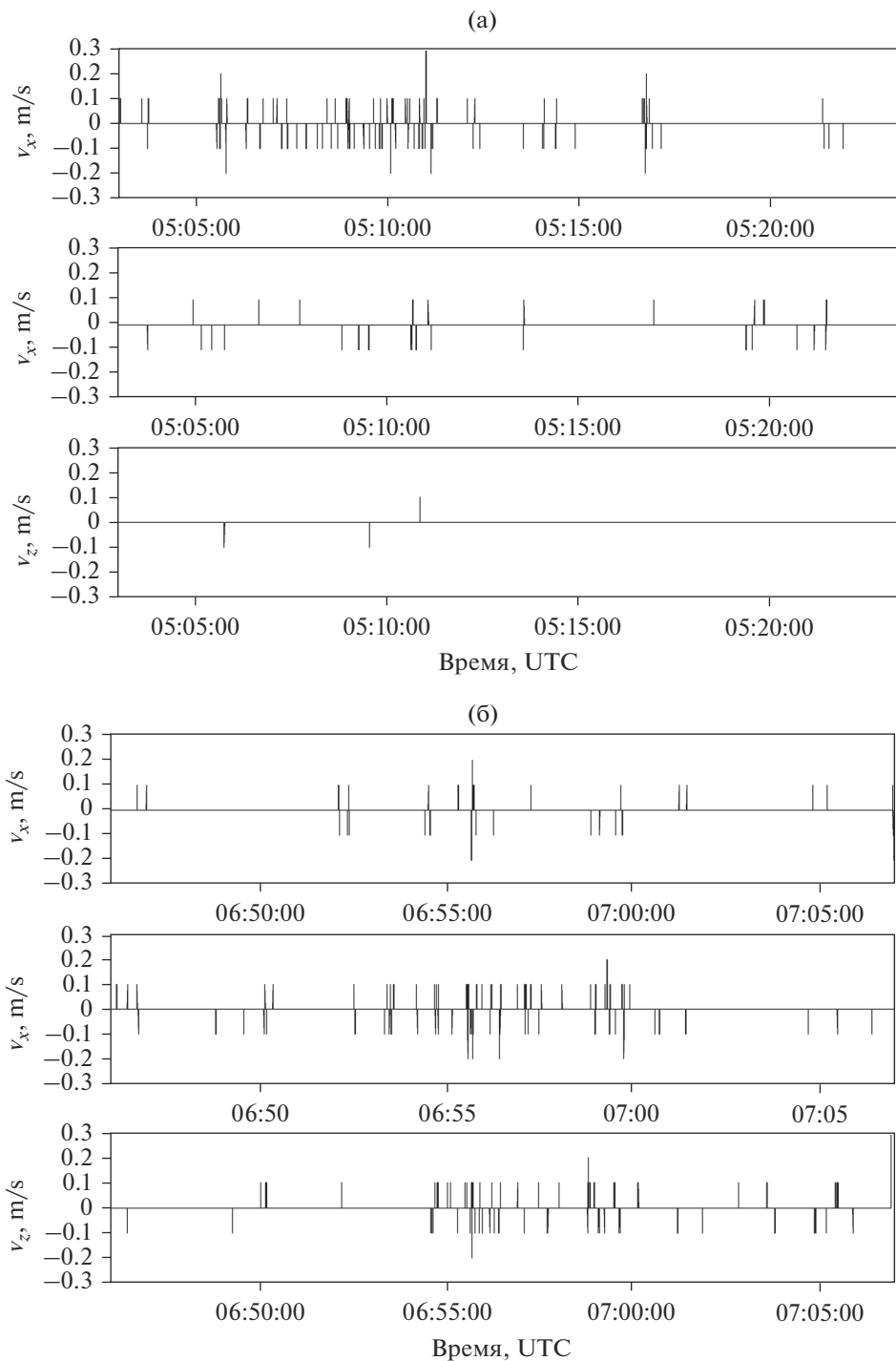


Рис. 3. Компоненты скорости квадрокоптера *DJI Mavic Mini* относительно Земли по осям x , y , и z в период парения, 24.07.2020 (а) и 12.08.2020 (б).

содержит основную часть турбулентной энергии и где энергия вырабатывается плавучестью и сдвигом, инерционный диапазон, в котором энергия не вырабатывается и не рассеивается, а передается от больших масштабов к меньшим и диапазон диссипации, в котором кинетическая энергия преоб-

разуется во внутреннюю энергию. Рассмотрим поведение спектров турбулентности в инерционном и энергетическом диапазонах.

Поведение спектров турбулентности продольных и поперечных флуктуаций скорости в инерционном диапазоне подчиняется закону “пяти тре-

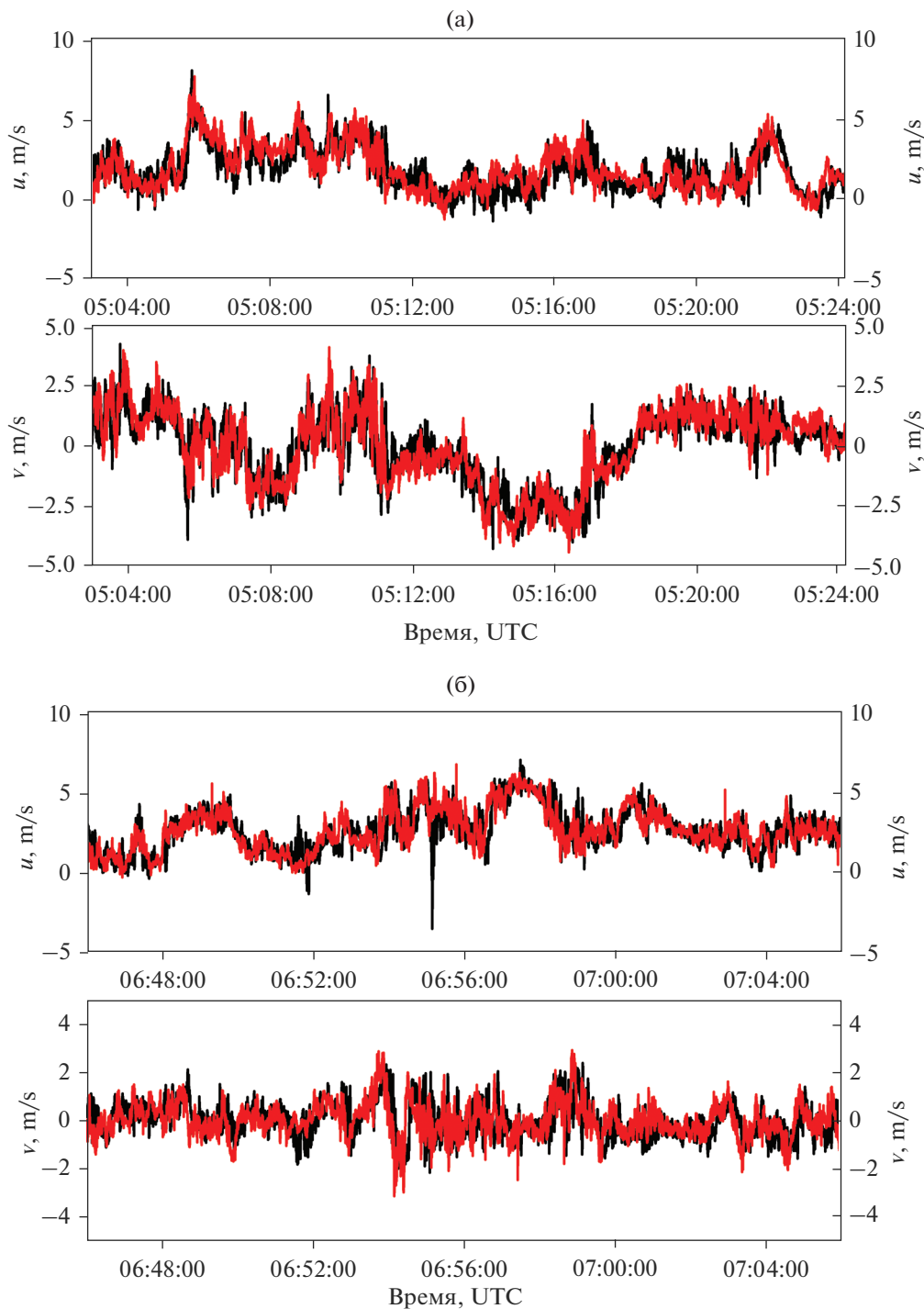


Рис. 4. Временные изменения продольных и поперечных компонент скорости ветра, измеренные с помощью АМК-03 (красные кривые) и *DJI Mini* (черные кривые) 24.07.2020 г. (а) и 12.08.2020 г. (б).

тей” Колмогорова–Обухова и описывается формулами (10) и (11). Пунктирной кривой на рис. 5 и 6 показаны спектры $\Phi(f) \sim f^{-5/3}$, который соответствует закону “пяти третей” Колмогорова–Обухова. Данные рисунки демонстрируют тот факт, что во время проведения эксперимента наблюдалась

колмогоровская турбулентность в инерционном диапазоне и качественно данный закон выполняется в широком интервале частот.

Из формулы (12) следует, что в инерционном диапазоне для изотропной турбулентности $\sigma_u^2 = \sigma_v^2$, поэтому отношение спектров турбулентности

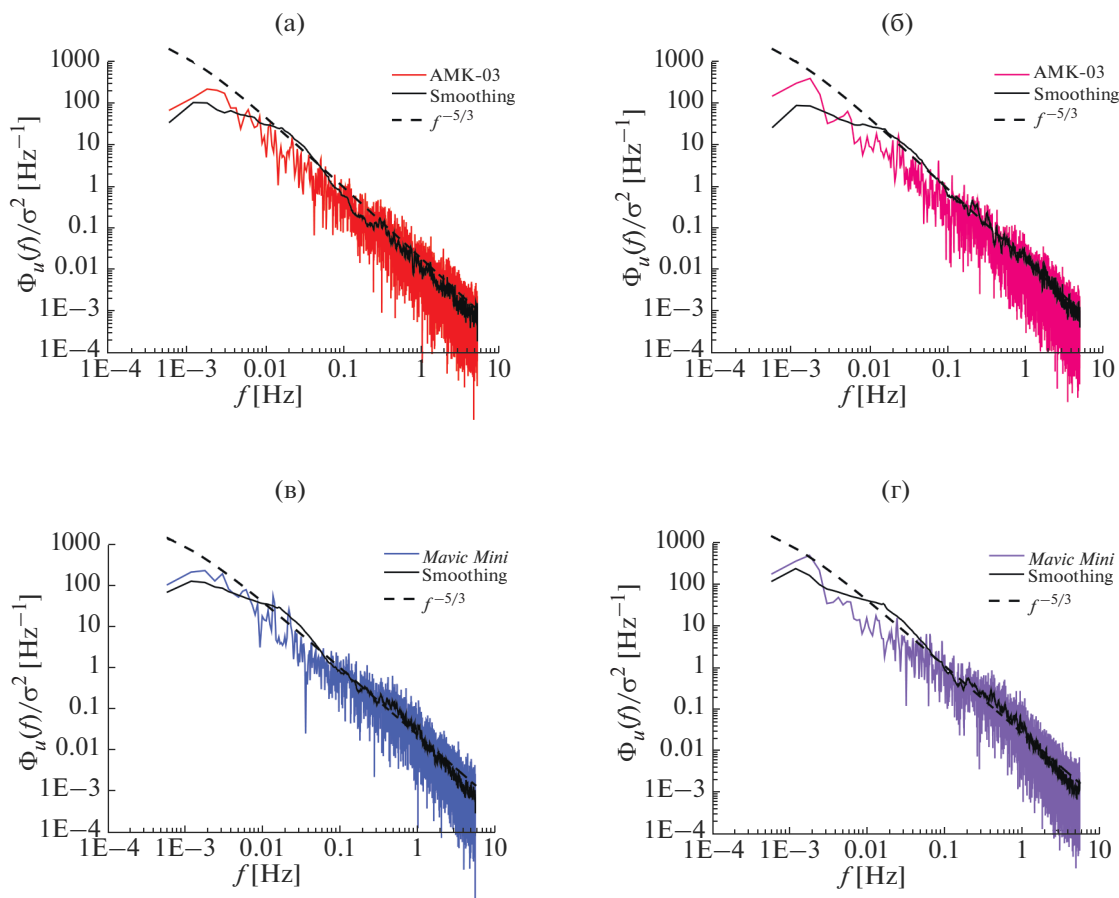


Рис. 5. Результаты измерений спектров турбулентности 24.07.2020 г. Продольные и поперечные спектры $\Phi_u(f)$ и $\Phi_v(f)$, рассчитаны по данным АМК-03 (а) и (б) и по данным DJI Mavic Mini (в) и (г); σ^2 – коэффициент нормировки.

$K_{4/3} = \Phi_v(f)/\Phi_u(f) = 4/3 \approx 1.33$. На рис. 7 представлены результаты сравнения спектров турбулентности для продольных и поперечных компонент скорости. Видно, что для измерений, полученных 24 июля 2020 г., в одинаковом диапазоне частот: $f \in [0.035, 0.065]$ кривая спектра $\Phi_u(f)$ лежит ниже кривой $\Phi_v(f)$, как для АМК-03 и DJI Mavic Mini. В случае измерений, проведенных 12 августа 2020 г., кривая продольного спектра лежит также ниже кривой спектра поперечных компонент, но в разных диапазонах частот:

$f \in [0.041, 0.011]$ для АМК-03 и $f \in [0.064, 0.011]$ для квадрокоптера.

Средние значения коэффициента $K_{4/3}$ приведены в табл. 1. Видно, что средняя величина коэффициента $K_{4/3}$ для измерений, полученных 24 июля 2020 г., в диапазоне частот $f \in [0.035, 0.065]$ совпадает с его значением для изотропной турбулентности. Также отмечается хорошее согласие значений коэффициента $K_{4/3}$ между данными АМК-03 и DJI Mavic Mini.

Из данных, приведенных в табл. 1, также следует, что 12 августа 2020 г. наблюдалась незначительная анизотропия турбулентности. Средняя величина коэффициентов $K_{4/3}$ для измерений, полученных в этот день с использованием как АМК-03, так и DJI Mavic Mini, в указанных диапазонах частот не совпадает с их значением для изотропной турбулентности. В то же самое время отмечается хорошее согласие значений коэффициента $K_{4/3}$ между данными АМК-03 и DJI Mavic Mini.

Таблица 1. Средние значения коэффициента $\langle K_{4/3} \rangle$

	АМК-03	DJI Mavic Mini
24 июля 2020 г.		
$\langle K_{4/3} \rangle$	1.23	1.22
12 августа 2020 г.		
$\langle K_{4/3} \rangle$	2.02	1.81

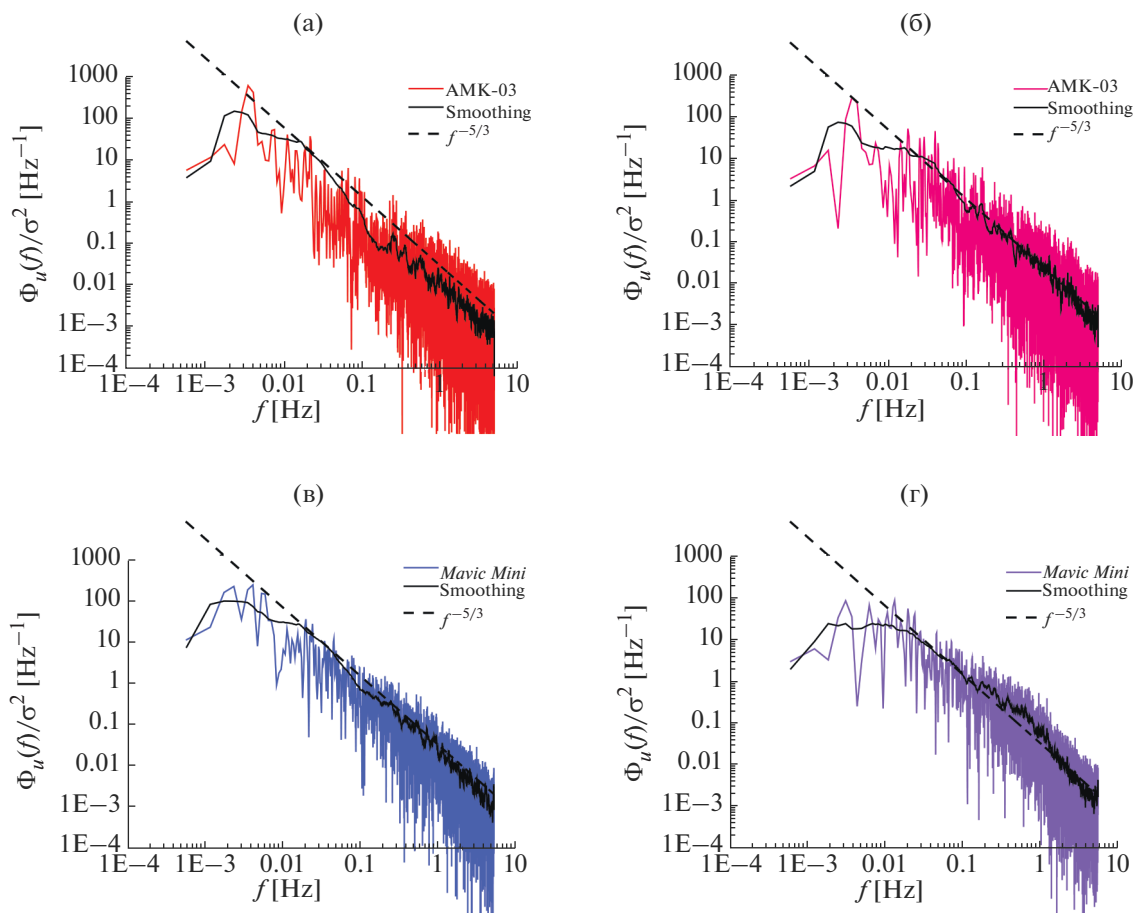


Рис. 6. Результаты измерений спектров турбулентности 12.08.2020 г. Продольные и поперечные спектры $\Phi_u(f)$ и $\Phi_v(f)$ рассчитаны по данным AMK-03 (а) и (б) и по данным *DJI Mavic Mini* (в) и (г); σ^2 – коэффициент нормировки.

На рис. 8 представлены результаты сравнения спектров продольных и поперечных компонент для AMK-03 и *DJI Mavic Mini*. Результаты сравнения показывают, что для измерений, выполненных 24 июля 2020 г., спектры турбулентности продольных компонент для двух различных методов измерений совпадают, такое же совпадение наблюдается для спектров турбулентности поперечных компонент. В случае эксперимента, осуществленного 12 августа 2020 г., наблюдается

хорошее согласие в совпадении продольных спектров турбулентности, а для поперечных спектров – качественное согласие.

Хорошо известно, что относительные спектры турбулентности содержат информацию о продольном и поперечном масштабах турбулентности L_u и L_v . Для оценки этих масштабов турбулентности применялся метод наименьших квадратов, в качестве кривой регрессии использовалась модель Кармана (7) и (8).

Значения интегральных масштабов турбулентности приведены в табл. 2. Видно, что масштабы турбулентности, рассчитанные по данным AMK-03 и *DJI Mavic Mini*, совпадают, также с хорошей точностью выполняется условие (9), которое описывает связь между продольными и поперечными масштабами в изотропной атмосфере.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. В работе исследован

Таблица 2. Интегральные масштабы турбулентности.

	L_u	L_v	L_v/L_u
24 июня 2020 г.			
AMK-03	13 m	8 m	0.6
<i>DJI Mavic Mini</i>	14 m	9 m	0.6
12 августа 2020 г.			
AMK-03	21 m	12 m	0.6
<i>DJI Mavic Mini</i>	21 m	14 m	0.7

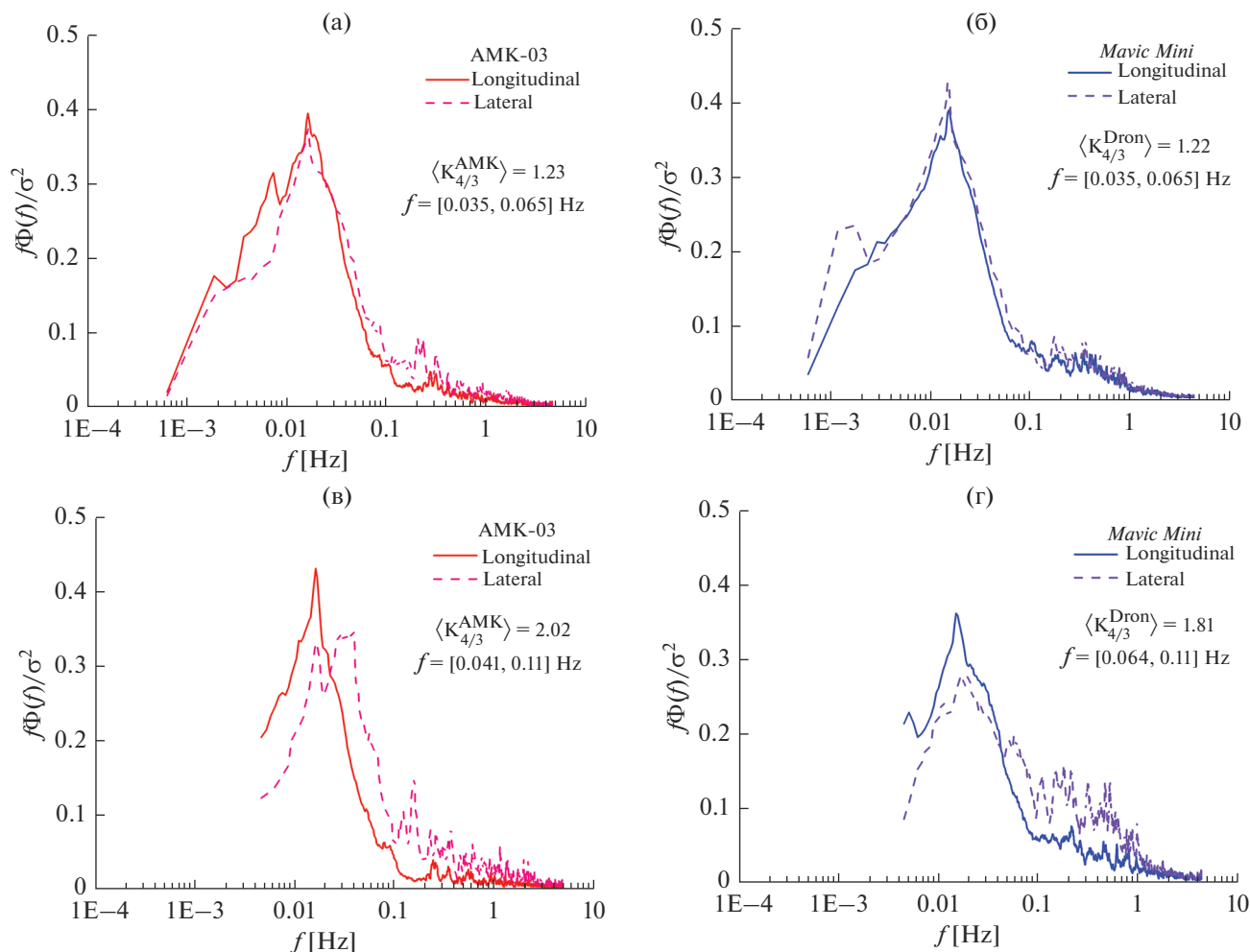


Рис. 7. Результаты измерений спектров турбулентности 24.07.2020 г. (а), (б) и 12.08.2020 г. (в), (г). Продольные и поперечные спектры $f\Phi_u(f)$ и $f\Phi_v(f)$ рассчитаны по данным АМК-03 (а), (в) и по данным *DJI Mavic Mini* (б), (г); σ^2 – коэффициент нормировки.

спектр турбулентности в атмосфере, который определяется на основе измерений, выполненных с помощью *DJI Mavic Mini*. Полученные спектры турбулентности сравнивались с данными автономного метеорологического комплекса АМК-03, которые являются объективной информацией о состоянии турбулентной атмосферы. Представлены результаты двух экспериментов, проведенных в Базовом экспериментальном комплексе ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, расположенном на окраине г. Томск, 24 июля и 12 августа 2020 г.

Установлено, что спектры турбулентности, полученные с помощью АМК-03 и *DJI Mavic Mini*, в целом совпадают, а незначительные различия наблюдаются в высокочастотной области спектра, начиная с $f \sim 1$ Hz. В высокочастотной области спектр турбулентности для *DJI Mavic Mini* затухает с ростом частоты незначительно, но

быстрее чем в случае данных, полученных с помощью АМК-03.

Изучено поведение сглаженных спектров турбулентности в инерционном и энергетическом диапазонах. Для данных, полученных 24 июля 2020 г., спектры турбулентности в инерционном диапазоне подчиняются закону “пяти третей”, а отношения измеренных спектров турбулентности поперечной и продольной компонент скорости соответствует изотропной турбулентности Колмогорова–Обухова $K_{4/3} = 4/3$. В случае измерений, выполненных 12 августа, наблюдалось незначительное отклонение от закона “пяти третей”, что фиксировалось как на основании измерений, полученных с помощью АМК-03, так и *DJI Mavic Mini*.

Для оценки продольных и поперечных масштабов турбулентности применялся метод наи-

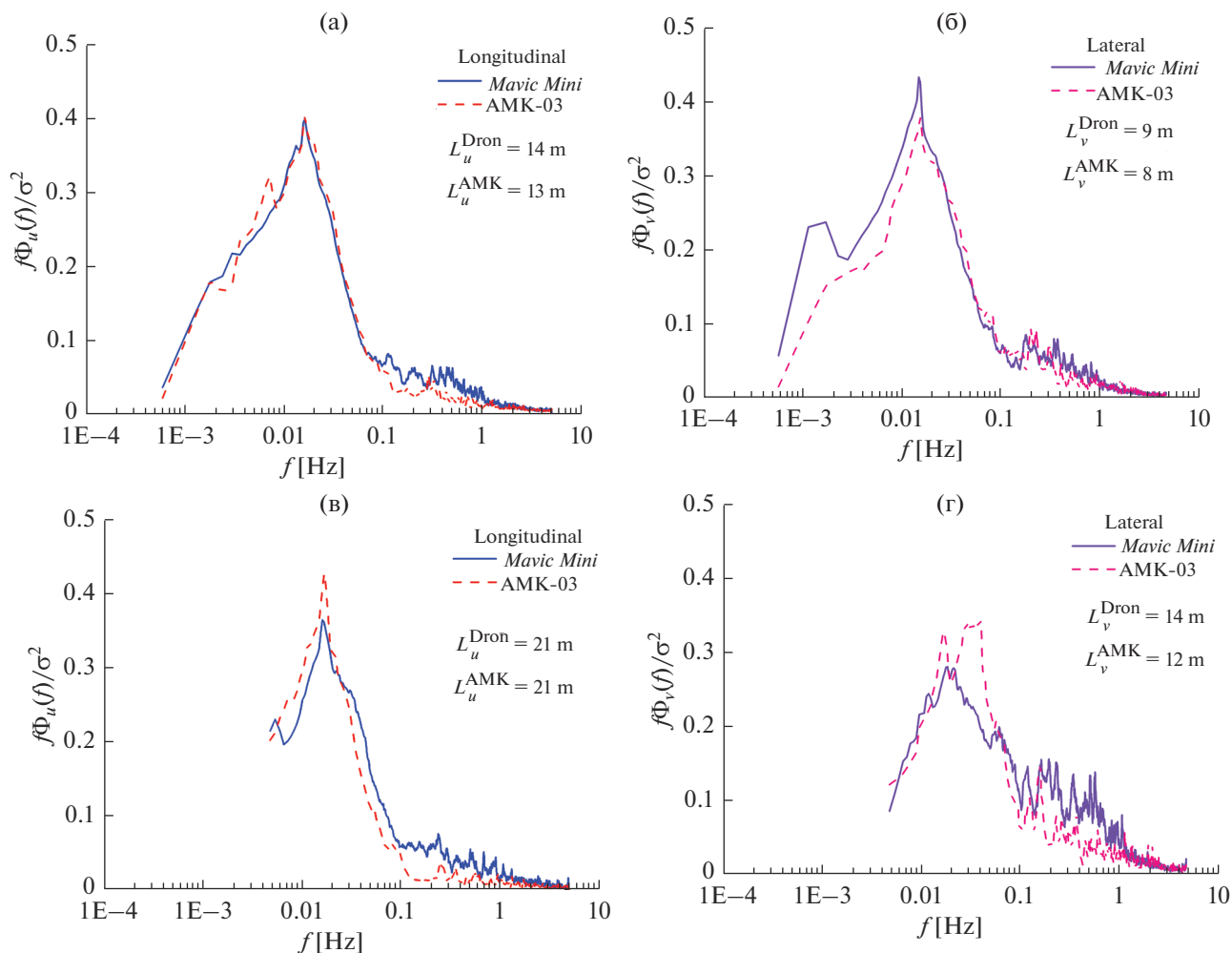


Рис. 8. Результаты сравнения продольных и поперечных спектров турбулентности $f\Phi_u(f)$ и $f\Phi_v(f)$, рассчитанных по данным АМК-03 и по данным *DJI Mavic Mini*. Данные измерений 24.07.2020 г. (а), (б) и 12.08.2020 г. (в), (г); σ^2 – коэффициент нормировки.

меньших квадратов, в качестве кривой регрессии использовалась модель Кармана. Масштабы турбулентности, рассчитанные по данным АМК-03 и *DJI Mavic Mini*, совпадают, также с хорошей точностью выполняется условие, которое описывает связь между продольными и поперечными масштабами в изотропной атмосфере.

При анализе экспериментальных данных отмечаются расхождения в поведении спектров турбулентности от их поведения в изотропной атмосфере, также наблюдалось расхождение между двумя методами измерений. Данным расхождением можно дать следующие объяснения. Экспериментальные исследования проводились на БЭК, расположенной на местности, которая не является в строгом понимании ровной и однородной поверхностью. Следовательно, одно-

значного совпадения данных АМК-03 и *DJI Mavic Mini* с результатами изотропной атмосферы ожидать не приходится.

При проведении эксперимента квадрокоптер находился на расстоянии ~ 10 м от АМК-03. Измерения интегральных масштабов турбулентности показали, что они по величине такого же порядка, как и расстояние от АМК-03 до *DJI Mavic Mini*. Такое соотношение масштабов и расстояний означает, что поля скорости ветра в точках нахождения АМК-03 и квадрокоптера частично коррелированы и поэтому говорить о полном соответствии данных измерений надо с некоторой долей осторожности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06066 мк.

ПРИЛОЖЕНИЕ

По аналогии с формулами (16)–(18) определим величины α_{\parallel} и α_{\perp} с помощью уравнений

$$\alpha_{\parallel} = n_x \alpha_x + n_y \alpha_y,$$

$$\alpha_{\perp} = -n_x \alpha_x + n_y \alpha_y,$$

где

$$\alpha_x = -(\langle \varphi \rangle s_{(\psi)} + \langle \theta \rangle c_{(\psi)}) - (\varphi' s_{(\psi)} + \theta' c_{(\psi)}),$$

$$\alpha_y = -(\langle \varphi \rangle s_{(\psi)} + \langle \theta \rangle c_{(\psi)}) - (-\varphi' c_{(\psi)} + \theta' s_{(\psi)}).$$

Оценки продольной и поперечной компонент скорости ветра, полученных с помощью квадратора, определим в виде

$$\hat{u} = a_{\parallel} \alpha_{\parallel} + b_{\parallel},$$

$$\hat{v} = a_{\perp} \alpha_{\perp} + b_{\perp}.$$

Коэффициенты a_{\parallel} , a_{\perp} , b_{\parallel} и b_{\perp} определяются из эксперимента с помощью формул

$$a_{\parallel} = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{\alpha_{\parallel, \max} - \alpha_{\parallel, \min}},$$

$$a_{\perp} = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{\alpha_{\perp, \max} - \alpha_{\perp, \min}},$$

$$b_{\parallel} = \langle u \rangle - a_{\parallel} \langle \alpha_{\parallel} \rangle,$$

$$b_{\perp} = \langle v \rangle - a_{\perp} \langle \alpha_{\perp} \rangle,$$

где $\langle u \rangle$, $\langle v \rangle$, u_{\max} , v_{\max} , u_{\min} и v_{\min} — средние, максимальные и минимальные значения продольной и поперечной компонент по данным АМК-03; $\langle \alpha_{\parallel} \rangle$, $\langle \alpha_{\perp} \rangle$, $\alpha_{\parallel, \max}$, $\alpha_{\perp, \max}$, $\alpha_{\parallel, \min}$ и $\alpha_{\perp, \min}$ — средние, максимальные и минимальные значения величин α_{\parallel} и α_{\perp} . По данным 24.07.2020 $a_{\parallel} = 0.56$, $b_{\parallel} = 0.16$, $a_{\perp} = 0.50$, $b_{\perp} = 0$; а для 12.08.2020 $a_{\parallel} = 0.54$, $b_{\parallel} = 0.06$, $a_{\perp} = 0.42$ и $b_{\perp} = 0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cornman L.B., Chan W.N. Summary of a Workshop on Integrating Weather into Unmanned Aerial System Traffic Management // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2017. V. 98. № 10. ES257–ES259.
2. Буард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 312 с.
3. Tieleman H.W. Universality of velocity spectra // J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1995. V. 56. № 1. P. 55–69.
4. 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.
5. 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.
6. Palomaki R.T., Rose N.T., van den Bossche M., Sherman T.J., De Wekker S.F.J. Wind estimation in the lower atmosphere using multirotor aircraft // J. Atmos. Ocean. Technol. 2017. V. 34. P. 1183–1190.
7. González-Rocha J., Woolsey C.A., Sultan C. Measuring atmospheric winds from quadrotor motion // AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Grapevine, Texas, USA. 2017.
8. Wang B.H., Wang D.B., Ali Z.A., Ting B.T., Wang H. An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle // Measurement and Control. 2019. V. 52. № 7–8. P. 731–739.
9. González-Rocha J., De Wekker S.F.J., Ross S.D., Woolsey C.A. Wind Profiling in the lower atmosphere from wind-induced perturbations to multirotor UAS // Sensors. 2020. V. 20. P. 1341.
10. Varentsov M., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Bogomolov V., Kuksova N., Marchuk E., Pashkin A., Varentsov A. Balloons and Quadcopters: Intercomparison of Two Low-Cost Wind Profiling Methods // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 380.
11. Reuder J., Jonassen M.O. Proof of concept for wind turbine wake investigations with the RPAS SUMO // Energy Procedia. 2016. V. 94. P. 452–461.
12. Reineman B.D. 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. P. 1295–1319.
13. Reineman B.D., Lenain L., Melville W.K. The Use of Ship-Launched Fixed-Wing UAVs for Measuring the Marine Atmospheric Boundary Layer and Ocean Surface Processes // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2016. V. 33. P. 2029–2052.
14. Balsley B.B., Lawrence D.A., Fritts D.C., Wang L., Wan K., Werne J. Fine Structure, Instabilities, and Turbulence in the Lower Atmosphere: High-Resolution In Situ Slant-Path Measurements with the DataHawk UAV and Comparisons with Numerical Modeling // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 2018. V. 35. P. 619–642.
15. Rautenberg A., Allgeier J., Jung S., Bange J. Calibration Procedure and Accuracy of Wind and Turbulence Measurements with Five-Hole Probes on Fixed-Wing Unmanned Aircraft in the Atmospheric Boundary Layer and Wind Turbine Wakes // Atmosphere. 2019. V. 10. P. 124.
16. 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.
17. Shelekhov A.P., Afanasiev F.L., Kobzev A.A., Shelekhova E.A. Opportunities to monitor the urban atmospheric turbulence using unmanned aerial system // Proc. SPIE 11535, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments V, 1153506 (20 September 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2573486>

18. *Shelekhov A.P., Afanasiev F.L., Kobzev A.A., Chupina O.S., Tel'minov A.E., Shelekhova E.A.* Spectra of turbulent fluctuations of Euler angles of unmanned aerial vehicles in the altitude holding mode // Proc. SPIE XXVI International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics AOO202 – 115605H <https://doi.org/10.1117/12.2576773>
19. *Shelekhov A., Afanasiev A., Kobzev A., Shelekhova E., Tel'minov A., Molchunov A., Poplevina O.* Low-Altitude Atmospheric Turbulence Sounding on the Basis of Unmanned Aerial Vehicle // Preprints 2020, 2020090595 <https://doi.org/10.20944/preprints202009.0595.v1>
20. *Monin A.S., Yaglom A.M.* Statistical Hydromechanics. Part 2. Turbulent Mechanics. Moscow: Nauka, 1967.
21. *Kaimal J.C., Finnigan J. J.* Atmospheric Boundary Layer Flows. Their Structure and Measurement. New York, Oxford: Oxford University Press, 1994.
22. *Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A., Shelevoi V.D.* A field version of the AMK-03 automated ultrasonic meteorological complex // Russian Meteorology and Hydrology. 2009. V. 34. № 2. P. 133–136.
23. *Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Kobzev A.A. et al.* AMK-03 Automatic weather stations, their modifications and applications // Sensors and systems. 2012. V. 3. № 154. P. 47–52.

Use of Small-Size UAVs for Turbulence Measurements in the Atmosphere

**A. P. Shelekhov^{1, *}, A. L. Afanasiev², E. A. Shelekhova¹, A. A. Kobzev¹,
A. E. Tel'minov¹, A. N. Molchunov¹, and O. N. Poplevina¹**

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Academiczny ave., 10/3, Tomsk, 634055 Russia*

²*Zuev Institute of Atmospheric Optics Organization SB RAS, Academiczny Zuev square, 1, Tomsk, 634055 Russia*

**e-mail: ash1404@mail.ru*

The paper demonstrates the possibility of using telemetry of small-size unmanned aerial vehicles (UAVs) to monitor the state of atmospheric turbulence. The turbulence spectrum was determined from the data on the roll, pitch, and yaw angles of the DJI Mavic Mini quadcopter and then compared with measurements of AMK-03 autonomous sonic weather station. The measurements were carried out at the Basic Experimental Observatory (BEK) of the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Tomsk, Russia), whose territory has nearly smooth and uniform surface, on July 24 and August 12 of 2020. It has been found that the turbulence spectra obtained with AMK-03 and DJI Mavic Mini are generally identical with minor discrepancies in the high-frequency spectral range from $f \sim 1$ Hz. For the data obtained in July, the turbulence spectra in the inertial range obey the “5/3” law, and the relation of measured turbulence spectra of the longitudinal and transverse velocity components corresponds to the Kolmogorov—Obukhov isotropic turbulence. As to the data obtained in August, slight deviation from the “5/3” law was observed in both AMK-03 and DJI Mavic Mini measurements. The longitudinal and transverse turbulence scales were estimated by the least-square fit method with the von Karman model as a regression curve. The turbulence scales calculated from the July and August data of AMK-03 and DJI Mavic Mini coincide, and the condition describing the relation between the longitudinal and transverse scales in the isotropic atmosphere keeps true to a good accuracy.

Keywords: unmanned aerial vehicle, low-altitude sounding, atmospheric turbulence, spectrum, turbulence scales