

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ
«ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА Н.Е. ЖУКОВСКОГО И Ю.А. ГАГАРИНА»
(Г. ВОРОНЕЖ) МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ (МИНОБОРОНЫ РОССИИ)



СБОРНИК СТАТЕЙ ПО МАТЕРИАЛАМ

VI Всероссийской научно-практической конференции

**«МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ
МЕТЕОРОЛОГИИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ,
ЭКОЛОГИИ И СИСТЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА»
(17-18 марта 2020)**

Воронеж
ВУНЦ ВВС «ВВА» 2020

УДК 551.5+504+528.7
ББК 26.23+20.1+39.53
В 63

В63 Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга [текст]: сб. ст. по материалам VI Научно-практической конференции «Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга» (17-18 марта 2020). – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. – 350 с.

В сборник включены статьи, разработанные по материалам докладов, сделанных на заседании секций VI Научно-практической конференции «Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга» (17-18 марта 2020) ВУНЦ ВВС «ВВА, и рекомендованные к опубликованию ученым советом 1 факультета (гидрометеорологического) ВУНЦ ВВС «ВВА» (протокол заседания № 15 от 4 мая 2020 г.).

Рассматриваемая предметная область посвящена научным исследованиям в области методологических и технологических аспектов совершенствования метеорологии специального назначения, технологий и средств мониторинга окружающей среды, метрологического обеспечения, изучения взаимосвязей организационно-технических систем с окружающей средой.

Материалы статей могут быть успешно использованы преподавательским составом вузов, научными сотрудниками, докторантами, адъюнктами, а также курсантами в ходе курсового и дипломного проектирования.

УДК 551.5+504+528.7
ББК 26.23+20.1+39.53

Без редакционной подготовки
(материалы размножены в авторской редакции)

© ВУНЦ ВВС «ВВА»
(г. Воронеж), 2020

УДК 504.064.36:551.508

**А.П. ШЕЛЕХОВ, А.Л. АФАНАСЬЕВ, А.А. КОБЗЕВ, О.С. ЧУПИНА,
А.Е. ТЕЛЬМИНОВ, Е.А. ШЕЛЕХОВА**

ФГБУН ИМКЭС СО РАН (г. Томск)

СПЕКТРЫ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В РЕЖИМЕ УДЕРЖАНИЯ ВЫСОТЫ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований спектров флуктуаций скорости беспилотного летательного аппарата в режиме удержания высоты в турбулентной атмосфере. Показано, что флуктуации скорости беспилотного летательного аппарата являются анизотропными полем, а в высокочастотной области спектров подчиняются закону Колмогорова-Обухова только в горизонтальной плоскости.

При движении в атмосфере беспилотный летательный аппарат (БПЛА) испытывает различные негативные воздействия, в числе которых турбулентность является одним из главных факторов. Несмотря на наличие системы стабилизации хаотические вихри, характерные для турбулентной атмосферы, могут приводить к случайным изменениям положения центра масс БПЛА в пространстве со временем. Таким образом, задача учета турбулентного состояния атмосферы представляет практический интерес, особенно при полетах в условиях городской застройки. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований турбулентных спектров флуктуаций скорости БПЛА в режиме удержания высоты.

По аналогии с теорией турбулентности определим корреляционную функцию скорости БПЛА $B_{ij}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ в виде

$$B_{ij}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \langle u'_i(\mathbf{r}) u'_j(\mathbf{r}') \rangle, \quad (1)$$

где $u'_i(\mathbf{r})$ - координаты вектора флуктуаций скорости БПЛА, $\langle \dots \rangle$ - операция статистического усреднения по флуктуациям скорости БПЛА, индексы i, j нумеруют ортогональные компоненты вектора скорости $\mathbf{u}'(\mathbf{r})$ по осям X, Y, Z.

Следуя экспериментальным и теоретическим исследованиям турбулентных флуктуаций скорости турбулентного потока [1] предположим, что трехмерный пространственный спектр флуктуаций $\mathbf{u}'(\mathbf{r})$ представляет собой тензор второго ранга. При таком предположении для изотропных флуктуаций $\mathbf{u}'(\mathbf{r})$ спектральный тензор $\Phi_{ij}(k)$ определяется одной скалярной функцией волнового числа $k = |\mathbf{k}|$ выражением

$$\Phi_{ij}(k) = \frac{1}{4\pi k^2} \left(\delta_{ij} - \frac{k_i k_j}{k^2} \right) E(k), \quad (2)$$

где $E(k)$ – энергетический спектр флуктуаций скорости БПЛА; k_i – координаты вектора \mathbf{k} ; δ_{ij} – δ -символ Кронекера.

В случае изотропных флуктуаций скорости турбулентного потока в инерционном интервале волновых чисел достаточно хорошо выполняется закон «пяти третей» Колмогорова-Обухова [1]

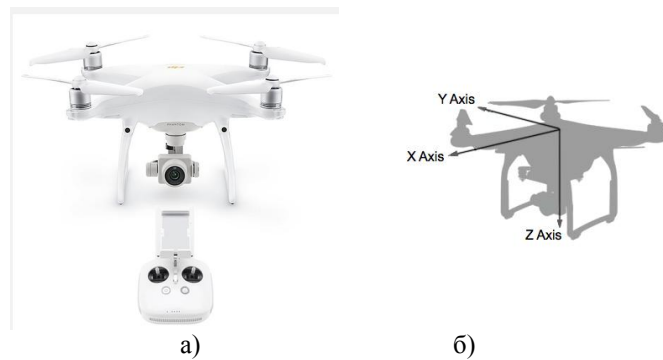
$$E(k) \sim \varepsilon \cdot k^{-5/3}, \quad (3)$$

где ε скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

Экспериментальные исследования турбулентного спектра флуктуаций скорости БПЛА в режиме удержания высоты проводились на территории Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН с использованием квадрокоптера *DJI Phantom 4 Pro*.

На рисунке 1 изображен БПЛА *DJI Phantom 4 Pro* и система координат относительно его центра масс. Из рисунка 1б видно, что в отличие от системы координат, принятой в метеорологии, три перпендикулярные оси определены так, что ось X направлена через переднюю часть БПЛА, ось Y проходит через правую часть и ось Z - через нижнюю часть БПЛА, а начало координат является центром масс.

При проведении эксперимента квадрокоптер поднимался на высоту 18 м над поверхностью земли и удерживался в этом режиме в течение 13.7 минут, при этом он был ориентирован так, что ось X была направлена на юг. Начало измерений 6:05:00 UTC 16.01.2020 г. В период проведения эксперимента на территории Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН фиксировался южный ветер, это означает, что его направление противоположно оси X.



а) квадрокоптер; б) система координат

Рисунок 1 – Квадрокоптер *DJI Phantom 4 Pro* и система координат относительно центра БПЛА

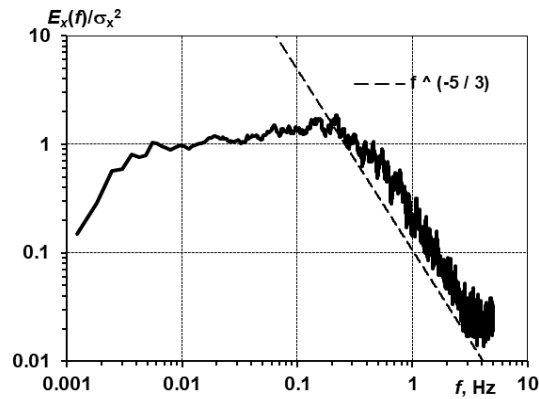
Спектры мощности флуктуаций скорости квадрокоптера $E_i(f_k)$ рассчитываются с использованием экспериментальных данных о его скорости $\mathbf{u}(t)$ по известной методике оценивания автоспектров, изложенной в [2]:

$$E_i(f_k) = \frac{2T}{n_d} \sum_{n=1}^{n_d} |U_i^{(n)}(f_k)|^2, \quad (4)$$

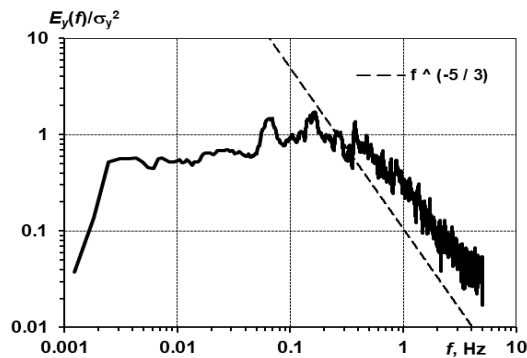
$$U_i^{(n)}(f_k) = \frac{f_k}{N} \sum_{l=1}^{N-1} u_i'(t_l^{(n)}) e^{-j2\pi k l / N}. \quad (5)$$

где f_k – частота, $n_d = 3$ – число смежных отрезков длиной T , индекс i нумерует ортогональные компоненты вектора скорости $\mathbf{u}'(\mathbf{r})$ по осям X, Y, Z. В рассматриваемом эксперименте временной шаг $\Delta t = 0.1$ с, а общее время усреднения время $n_d T = 13.7$ минут.

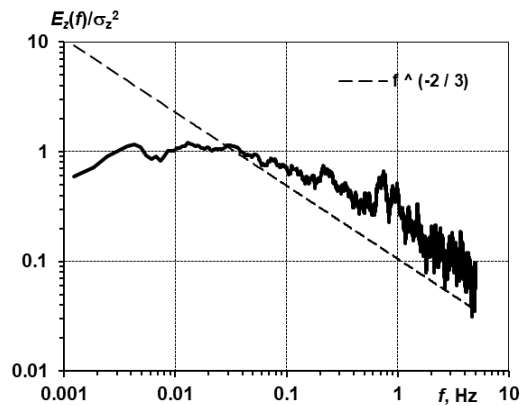
На рисунке 2 показаны нормированные спектры мощности флуктуаций скорости БПЛА в режиме удержания высоты по осям X, Y, Z. Пунктирной кривой на рисунках 2а, б показан спектр мощности флуктуаций скорости, который соответствует закону «пяти третей» Колмогорова-Обухова $E(f) \sim f^{-5/3}$, а пунктирной кривой на рисунке 2в – спектр флуктуаций скорости, зависимости которого имеет вид $E(f) \sim f^{-2/3}$, σ_i^2 - коэффициенты нормировки. Из рисунков 2а, б видно, что в режиме удержания высоты в высокочастотной области спектров можно выделить интервал, который можно условно назвать инерционным интервалом. В пределах данного интервала флуктуации скорости квадрокоптера по осям X и Y, расположенных в горизонтальной плоскости, подчиняются закону Колмогорова-Обухова $E_{x,y}(f) \sim f^{-5/3}$. Флуктуации скорости квадрокоптера в вертикальной плоскости существенным образом отличается от закона «пяти третей» и имеет зависимость $E_z(f) \sim f^{-2/3}$.



а) Спектр мощности флуктуаций скорости квадрокоптера по оси X



б) Спектр мощности флуктуаций скорости квадрокоптера по оси Y



в) Спектр мощности флуктуаций скорости квадрокоптера по оси Z

Рисунок 1 – Спектры мощности флуктуаций скорости квадрокоптера по осям X, Y, Z

Таким образом, флуктуации скорости используемого БПЛА являются анизотропными полем. Изотропность флуктуаций скорости квадрокоптера выполняется только в горизонтальной плоскости, и, следовательно, формулы (2) и (3) справедливы только в плоскости X и Y. В докладе будут представлены результаты измерений спектров мощности флуктуаций скорости турбулентного потока, полученных с помощью АМК-03 [3], расположенной в непосредственной близости от квадрокоптера.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1965-1967. Ч. 1, 2.
- 2 Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1986. 540.

З Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кобзев, А.А. Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47-52.

УДК 551.586:519.876

Ю.В. ШИПКО, В.С. БАЛАКИН, Н.В. ЗИБРОВА

ЦНИИ ВВС (Минобороны России)

Е.В. ШУВАКИН

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

ОЦЕНКА БИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА НА ОТКРЫТОЙ МЕСТНОСТИ ДЛЯ РАЙОНОВ С ЖАРКИМ КЛИМАТОМ

В статье рассматриваются прогностические модели альтернативной оценки безопасности работ персонала на открытой местности в условиях жаркого климата, построенные на базе дискриминантного анализа. В качестве критериального параметра применен специализированный биометеорологический показатель. Используются данные по метеорологическим станциям юга Европейской территории России.

Деятельность авиационного персонала, связанная с выполнением технологических процессов по подготовке (обслуживанию) вооружения, военной и специальной техники, протекающих на открытом воздухе в экстремально жарких условиях, имеет определенные ограничения, обусловленные снижением работоспособности и риском для здоровья. При физической нагрузке в условиях работы на открытом солнце действия человека становятся неадекватными, организм подвергается изменениям, возникают отрицательные последствия: болезненные спазмы в мышцах, тепловое истощение, тепловой удар.

Для оценки влияния метеорологических условий на организм человека в практике метеорологического обеспечения различных потребителей используются биометеорологические показатели (индексы), в число которых входят и тепловые индексы, которые нашли применение в климатологии, курортологии, отраслях экономики [1, 2]. Однако большинство индексов оценивают или степень комфортности климатических условий, или эргономические свойства рабочих мест в помещении [3], или предполагают биометрические измерения в процессе работы персонала [4], или включают параметры (уровень солнечной радиации, температура внутри шарового термометра [5] и др.), по которым отсутствуют средства измерений в метеорологическом подразделении.

Известные индексы «теплого стресса» учитывают комплекс «ключевых» факторов [4, 5] теплового воздействия: температуру и влажность окружающего воздуха, среднюю радиационную температуру, движение воздуха, суммарную метаболическую теплоту, выделяемую телом, физические особенности одежды работающего персонала. Но все они не отвечают требованиям «военного назначения», не соответствуют модели поддержки принятия метеозависимых решений, не учитывают необходимый технологический период подготовки техники.

Цель работы – повышение эффективности метеорологического обеспечения деятельности авиационного персонала путем разработки прогностической модели, позволяющей дать альтернативную оценку безопасности работ (в течение определенного технологического периода) на открытой местности в жарких условиях летнего сезона.

Исходная информация. Для построения прогностических моделей использовались архивные данные по станциям юга Европейской территории России (Верхний Баскунчак, Астрахань, Сочи) за июль 1999–2018 гг. (дневные сроки наблюдений 12, 15, 18 ч московского времени), где учитывались случаи с максимальной температурой воздуха между сроками $t_{\max} > 25,5^{\circ}\text{C}$. В качестве контрольной выборки использовались аналогичные данные, но периода 1990–1998 гг.

Решается задача классификации дискриминантного анализа [6]. Исходная информация по рассматриваемым станциям используется как обучающая с целью описания процедур, с помощью которых при поступлении входных данных нового объекта (условий погоды) его можно было бы с наибольшей точностью отнести к одному из классов. Для характеристики