

## ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 550.388.2; 551.510.535

# Мониторинг ветровой обстановки и индикация спутных следов в районе взлетно-посадочной полосы аэропорта пассивным оптическим методом

А.Л. Афанасьев, В.А. Банах, Д.А. Маракасов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 7.03.2019 г.

Проведены измерения скорости ветра и атмосферной турбулентности в районе взлетно-посадочной полосы аэропорта пассивным оптическим методом, основанным на корреляционном анализе турбулентных искажений удаленных объектов наблюдения. Оптическая трасса была организована в районе приземного участка глиссады снижения самолетов вблизи начала взлетно-посадочной полосы. После прохождения воздушного судна над линией визирования измерителя на фоне умеренного бокового ветра устойчиво фиксировались значительные выбросы скорости и усиление турбулентности, обусловленные спутным следом. Полученные результаты свидетельствуют о практической возможности использования данного метода для приборной индикации наличия или отсутствия спутных следов над территорией аэропорта. Такая информация может быть полезной при оценках безопасных интервалов движения в процессе организации взлетов и посадок воздушных судов.

*Ключевые слова:* скорость ветра, турбулентность, спутный след, авиабезопасность, пассивный оптический метод; crosswind, turbulence, aircraft vortex, air transport safety, passive optical monitoring.

### Введение

Одной из важнейших проблем современной авиации является предотвращение попадания воздушного судна в вихревые воздушные потоки, образованные в результате пролета другого летательного аппарата [1]. Такие ограниченные возмущенные массы воздуха, известные как спутная струя, или спутный след, могут сохраняться в атмосфере длительное время, несят непредсказуемый характер и представляют значительную опасность для полетов. Общая длина вихревого следа составляет несколько километров и зависит от состояния атмосферы, аэродинамической компоновки и полетной конфигурации летательного аппарата, полетной массы, скорости и высоты полета. Эффект от спутного следа особенно ощутим, когда малые и средние воздушные суда следуют за большими. В режиме взлета и посадки благодаря специальной конфигурации крыла создается максимальная подъемная сила, что также приводит к возникновению наиболее сильных воздушных возмущений.

Попадание в спутный след из-за высокой турбулентности воздушных масс вызывает сильную болтанку вплоть до полной потери управляемости. Зафиксировано большое количество авиационных происшествий зачастую с трагическими последствиями,

обусловленных воздействием спутного следа. В последнее время в связи с высокой интенсивностью движения в современных крупных аэропортах предотвращение подобных ситуаций становится актуальным. Повышенную потенциальную опасность спутный след представляет в условиях прозрачной атмосферы, когда он визуально не наблюдаем, особенно во время взлета или посадки при ограниченных возможностях маневра на малых высотах.

Авиадиспетчеры прогнозируют наличие спутного следа при организации взлетов и посадок и с учетом фактических метеоусловий выдерживают интервалы, достаточные для рассеивания или сноса ветром возмущенного воздуха из зоны глиссады. Однако сложная зависимость времени существования, эволюции и траектории смещения спутной турбулентности от атмосферных метеопараметров, характеристик летательного аппарата и направления его движения делает актуальной задачу непосредственной приборной индикации данного явления.

В последнее время для контроля спутных струй в зоне глиссады начинают применять лидары [2–5]. Однако эти приборы достаточно сложны и дороги и их применение ограничено небольшим количеством аэропортов.

Более простые методы измерения ветра и турбулентности — методы просвечивания, основанные на статистическом анализе флуктуаций светового излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере [6, 7]. В [8] для оценки скорости ветра использован метод, базирующийся на анализе

\* Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru).

турбулентных флуктуаций интенсивности (сцинтилляций) просвечивающего излучения. Использование сцинтиллометров на взлетно-посадочной полосе (ВПП) показало, что детектирование спутного следа возможно в ночное время при относительно слабой турбулентности. В дневное время при повышении уровня турбулентности уже на достаточно коротких по сравнению с ВПП трассах флуктуации интенсивности насыщаются и чувствительность прибора к вихревым следам резко падает [8].

В данной статье представлены результаты мониторинга ветровой обстановки в аэропорту «Толмачево» г. Новосибирска пассивным оптическим методом. Измерения выполнены с помощью макета пассивного оптического измерителя (ПОИ), позволяющего оценивать скорость ветра на трассах длиной до 3 км, в том числе и в условиях сильной оптической турбулентности [9]. При построении макета реализован подход к оценке скорости ветра и атмосферной турбулентности, основанный на явлении дрожания некогерентных изображений удаленных объектов наблюдения [10], который свободен от ограничений, связанных с насыщением флуктуаций интенсивности. Важная особенность метода и прибора – полное отсутствие любых источников искусственного электромагнитного излучения, что особенно актуально в условиях аэропорта. При этом макет позволяет дистанционно в режиме реального времени проводить измерения поперечной к линии визирования компоненты скорости ветра и структурной постоянной показателя преломления воздуха  $C_n^2$ , характеризующей мощность оптической турбулентности.

Цель экспериментов – изучение возможности детектирования спутных следов при взлете и посадке пассажирских самолетов в районе ВПП аэропорта с помощью ПОИ.

## Организация и методика измерений

С учетом выделенного на территории аэропорта места расположения измерительной аппаратуры в качестве подходящего объекта наблюдения были выбраны дымовые трубы на удалении  $L = 3100$  м от места размещения ПОИ, хорошо различимые на фоне неба. На рис. 1 показана ориентация на мест-

ности оптической трассы, на которой осуществлялись измерения поперечной компоненты интегральной скорости ветра и структурной характеристики показателя преломления воздуха. Угол между измерительной трассой и ВПП составлял  $23^\circ$ , т.е. регистрировалась компонента ветра, близкая к направлению, поперечному ВПП (под углом  $67^\circ$ ).

Внешний вид оптической части макета видеодигитрового измерителя поперечной компоненты скорости ветра представлен на рис. 2. В процессе измерений на экране монитора компьютера в режиме реального времени отображаются временной график измеряемого ветра, текущее значение поперечной скорости и вид корреляционной функции.

За время измерений было зафиксировано более 40 посадок самолетов, глиссада снижения которых проходила непосредственно над измерительной трассой ПОИ. Процесс снижения самолета и момент пересечения его траектории и линии визирования записывались на видео для фиксации точного времени прохождения самолетов. На рис. 3 приведен пример посадки самолета в момент пролета над трубами, служащими объектом наблюдения в процессе измерений. На переднем плане видны приемные объективы бинокулярной оптической системы ПОИ, формирующие изображения выбранного объекта для дальнейшей компьютерной обработки и вычисления оценок скорости ветра. Линиями показано направление на объект наблюдения. На выноске – выделенный рабочий участок изображения, используемый ПОИ.

Измерения скорости ветра проводились по V-образной схеме, где оба канала оптической системы наведены на один и тот же контрастный объект. В качестве последнего был выбран край трубы, дающий хорошо различимую вертикальную границу темного и светлого участков изображения. В каждом канале в моменты времени  $t_j$ , следующие с частотой видеокладов, вычислялись полная интенсивность засветки

$$P(t_j) = \sum_{l,m=0}^{N-1} I_{lm}(t_j) \quad (1)$$

и координаты энергетического центра тяжести (ЭЦТ) изображений размером  $N \times N$  пикселей



Рис. 1. Ориентация оптической трассы ПОИ относительно ВПП

$$\left. \begin{matrix} d_x(t_j) \\ d_y(t_j) \end{matrix} \right\} = \frac{1}{P(t_j)} \sum_{l,m=0}^{N-1} \left\{ \begin{matrix} l - N/2 \\ m - N/2 \end{matrix} \right\} I_{lm}(t_j). \quad (2)$$

В силу специфики выбранных участков изображений горизонтальные смещения ЭЦТ ( $d_x$ ) значительно более информативны по сравнению с вертикальными ( $d_y$ ). Именно они, наряду с мощностью засветки, использовались для оценки интегральных значений параметров атмосферы.

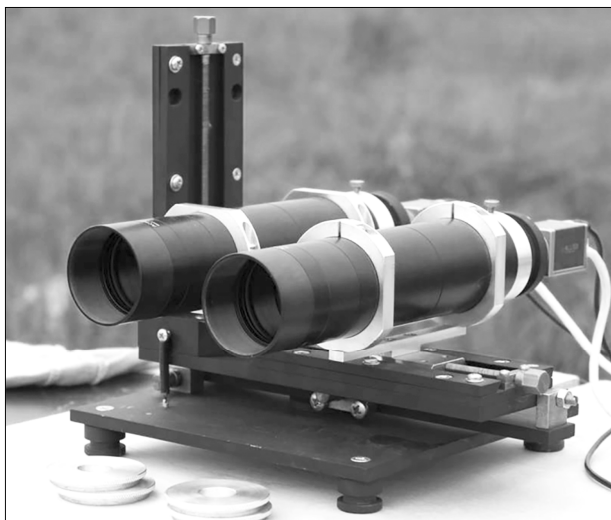


Рис. 2. Внешний вид макета ПООИ

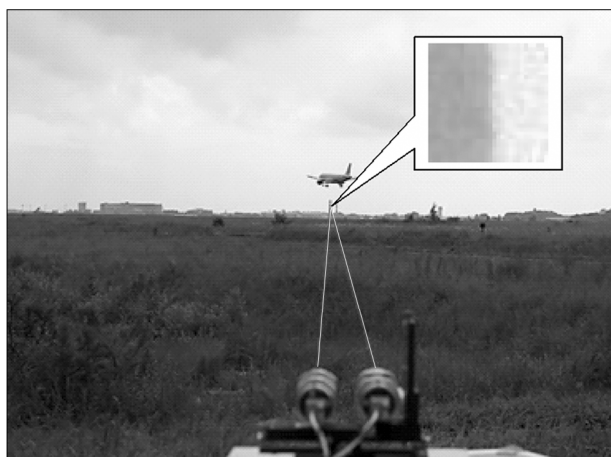


Рис. 3. Момент прохождения самолета над линией визирования ПООИ при посадке

Корреляционная обработка рядов проводилась в режиме реального времени по следующему алгоритму. Задавалась длительность интервала статистического усреднения ( $T_0 = 16$  с). На данном интервале вычислялись среднее значение интенсивности засветки и дисперсия горизонтальной координаты ЭЦТ в каждом канале, а также взаимная корреляционная функция (ВКФ) рядов горизонтальных смещений в правом и левом каналах. Выбранная длина интервала усреднения достаточна для формирования ВКФ с хорошо различимым максимумом [11].

Смещение  $\tau$  абсциссы максимума пересчитывалось в интегральную скорость ветра

$$V = \frac{D}{2\tau}, \quad (3)$$

где  $D$  – разнос объективов ПООИ.

Для расчета структурной характеристики  $C_n^2$  необходимо пересчитать сдвиг ЭЦТ в смещение изображения. Для этого использовались соотношения, полученные в [12] для вертикальной границы равномерно освещенного объекта с постоянной фоновой засветкой:

$$I(\mathbf{r}) = (I_s - I_0)\chi(x - X_0) + I_0,$$

где  $\chi(x)$  – функция Хевисайда [13];  $X_0$  – горизонтальная координата границы (в пикселях);  $I_0$  – фоновая засветка;  $I_s$  – интенсивность засветки в изображении объекта.

При настройке ПООИ положение границы выбиралось в центре изображения,  $X_0 = N/2$ . Зависимость горизонтальной координаты ЭЦТ от смещения изображения  $\rho_x$  при  $X_0 = N/2$  следующая:

$$d_x - \langle d_x \rangle = \frac{1}{2} \left( \frac{I_s - I_0}{I_s + I_0} \right)^2 \rho_x. \quad (4)$$

При длительных (несколько минут и более) непрерывных измерениях может заметно меняться освещенность объекта. В частности, если интенсивность засветки в изображении объекта  $I_s$  превысит предельный уровень приемной матрицы  $I_m = 2^{12} - 1$ , в формуле (4) следует  $I_s$  заменить на  $I_m$ . Отслеживание этого момента проводилось без анализа структуры изображений, полученных в процессе измерения, использовались только значения  $I_0$ ,  $I_s$ , найденные по первому кадру, и значения мощности засветки  $P(t_j)$  в текущем кадре. Критическое значение мощности определялось как

$$P_{cr} = \frac{I_m}{I_s} P(t_0). \quad (5)$$

При превышении этого уровня в формуле (4) используется  $I_m$  вместо  $I_s$ .

Отметим, что эта поправка незначительна при оценке ветра, поскольку пропорциональность сдвига ЭЦТ и смещения изображения сохраняется в любом случае, а следовательно, и смещение максимума ВКФ остается неизменным, меняется лишь его амплитуда. Однако для определения интегрального значения  $C_n^2$  используется дисперсия дрожаний изображения [14]:

$$C_n^2 = \frac{\Theta^2 a^{1/3}}{1,1L} \sigma_d^2, \quad (6)$$

где  $a = 0,025$  м – радиус объектива ПООИ;  $\Theta$  – угол, соответствующий одному пикселю изображения;  $\sigma_d^2 = \sigma_{d_x}^2 + \sigma_{d_y}^2 = 2\sigma_{d_x}^2$  – дисперсия смещений изображения. В этом случае изменение коэффициента пропорциональности в (4) имеет значение.

## Результаты измерений

На рис. 4 приведены примеры оценок интегральной скорости поперечного ветра на трассе методом пассивных оптических измерений в режиме реального времени. На оси времени отмечены моменты взлетов и посадок. На уровне временной метки пролета также приведены фото самолетов, порождающих конкретный спутный след. Видно, что на фоне легкого бокового ветра ( $\sim 1\text{--}3$  м/с) в моменты пролета самолетов наблюдаются резкие выбросы измеряемой скорости, обусловленные прохождением спутной струи. Через некоторое время после выноса спутной струи с линии визирования ПОИ невозмущенные (естественные) значения бокового ветра опять восстанавливаются.

На рис. 5 показан эпизод измерений при очень слабом боковом ветре (менее 1 м/с). Приведены графики одновременного изменения скорости

(вверху) и структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2$ , характеризующей мощность оптической турбулентности (внизу). В условиях слабого ветра при каждом пролете наблюдается двойной всплеск скорости с резкой сменой направления выброса на противоположное. Такое поведение отражает вихревой характер спутного следа. Очевидно, что при слабом выносе ветром возмущенного воздуха из зоны глissады и наличие резкой смены направления воздействие спутной струи становится наиболее опасным.

Из рис. 4, 5 видно, что приведенные ветровые данные находятся в интервале  $\pm 10$  м/с. Это объясняется тем, что максимальное значение модуля скорости  $V$ , регистрируемое ПОИ, определяется минимально измеримой задержкой  $\tau$  максимума ВКФ, которая ограничена величиной временного интервала дискретизации (межкадрового интервала)  $1/f$ . В силу конкретных технических характеристик

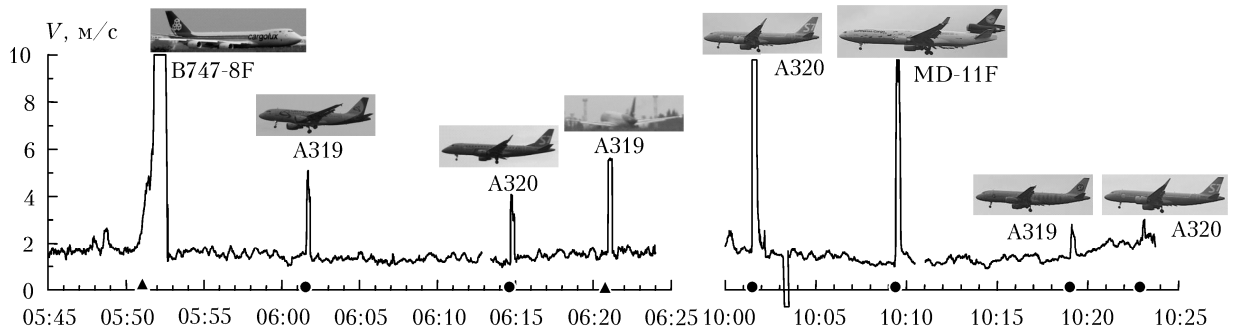


Рис. 4. Интегральная скорость поперечного ветра на оптической трассе, пролегающей ниже глissады снижения вблизи начала ВПП (▲ взлет; ● посадка)

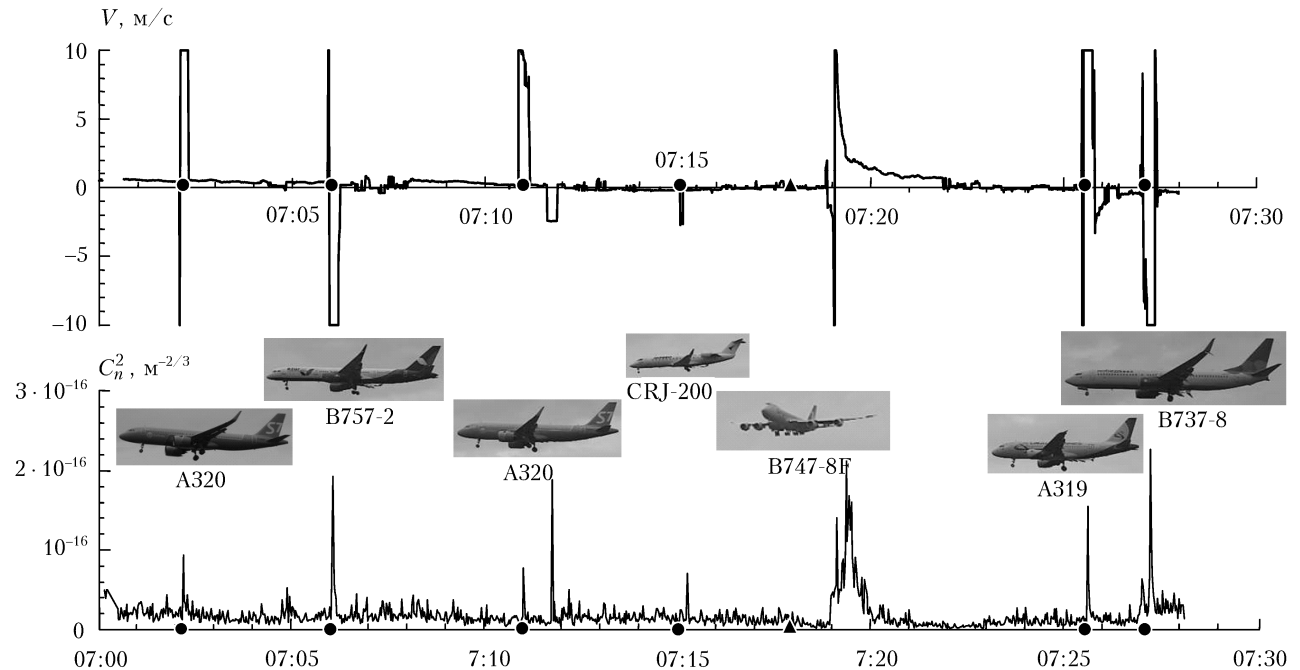


Рис. 5. Эпизод одновременных измерений скорости поперечного ветра (вверху) и структурной характеристики  $C_n^2$  (внизу), демонстрирующий вихревой характер спутного следа с резкой сменой направления поперечной скорости и усилением турбулентности (▲ взлет; ● посадка)

ПОИ (частота кадров  $f = 250$  Гц и разнос  $D = 10$  см) оценки скорости в данном случае были ограничены  $V_{\max} = 10$  м/с. Возможно, что в момент измерений реальные выбросы скорости несколько превышали это значение. Данное ограничение несущественно для демонстрации резких ветровых порывов, свидетельствующих о наличии спутного следа на луче зрения. Оно может быть преодолено путем уменьшения разноса объективов ПОИ и повышения частоты кадров видеосъемки.

На рис. 5 на графике изменения  $C_n^2$  в моменты прохождения спутной струи также видны характерные выбросы, в разы превышающие фоновые значения. Относительно небольшая амплитуда всплесков ( $\sim 2 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ ) объясняется тем, что измеряется интегральная по трассе характеристика, в то время как возмущения происходят на сравнительно небольшом локальном участке трассы. Оценки структурной характеристики в самом спутном вихре с учетом приближенных размеров зоны возмущения и линейности накопления флуктуаций угла прихода по трассе [14] дают величины порядка  $C_n^2 \sim 10^{-13} \div 10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$ , что близко к результатам измерений [8].

Возможность оценки  $C_n^2$  наряду со скоростью поперечного ветра при помощи ПОИ является дополнительным преимуществом метода. Одновременный мониторинг этих двух различных физических характеристик позволит повысить надежность и достоверность обнаружения возмущенного воздушного потока на луче зрения. Приведенные примеры демонстрируют отчетливую реакцию ПОИ на появление в районе ВПП возмущенного воздушного потока с резко отличающимися значениями локальной скорости и интенсивности турбулентности.

### Заключение

Формирование мощных вихревых воздушных потоков в районе ВПП аэропорта при взлете и посадке воздушных судов приводит к необходимости создания безопасных интервалов движения. Поскольку времена существования и пространственная локализация таких турбулентных возмущений трудно прогнозируемы, насущной проблемой является их непосредственное обнаружение при помощи технических средств. С целью изучения возможности детектирования спутных следов на территории аэропорта реализован пассивный оптический метод измерений поперечной к линии визирования (направлению на объект наблюдения) компоненты скорости ветра и атмосферной турбулентности, основанный на корреляционной обработке бинокулярных видеоизображений удаленных топографических объектов.

Полученные результаты свидетельствуют о практической возможности использования данного метода для оперативной дистанционной приборной индикации наличия или отсутствия спутных следов в районе ВПП и зоне глиссады воздушных судов. Особенно полезными данные пассивных оптических измерений могут стать в условиях чистой атмосферы

и при ясной тихой погоде, когда спутный след имеет повышенную пространственно-временную устойчивость и трудно обнаружим другими средствами. Минимизация интервалов движения, основанная на данных оперативных измерений в реальном времени, может существенно повысить пропускную способность аэропорта без построения дополнительных ВПП.

Работа выполнена по проекту фундаментальных исследований РАН № АААА-А17-117021310149-4 при частичной финансовой поддержке РФФИ, (проект № 18-42-700005 p\_a).

1. *Rosow V.J.* Lift-generated vortex wakes of subsonic transport aircraft // Prog. Aerospace Sci. 1999. V. 35, iss. 6. P. 507–660.
2. *Harris M., Young R.I., Köpp F., Dolfi A., Cariou J.-P.* Wake vortex detection and monitoring // Aerospace Sci. Technol. 2002. V. 6, iss. 5. P. 325–331.
3. *Smalikho I.N., Banakh V.A.* Estimation of aircraft wake vortex parameters from data measured with 1.5 mcm coherent Doppler lidar // Opt. Lett. 2015. V. 40, N 14. P. 3408–3411.
4. *Смалыхо И.Н., Банах В.А., Holzäpfel F., Rahm S.* Оценивание параметров самолетных вихрей из массива радиальных скоростей, измеренных когерентным доплеровским лидаром // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 742–750.
5. *Смалыхо И.Н., Банах В.А., Фалиц А.В.* Измерения параметров вихревых следов самолетов когерентным доплеровским лидаром Stream Line // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 8. С. 664–671; *Smalikho N., Banakh V.A., Falits A.V.* Measurements of aircraft wake vortex parameters by a Stream Line Doppler lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 6. P. 588–595.
6. *Lawrence R.S., Ochs G.R., Clifford S.F.* Use of scintillations to measure average wind across a light beam // Appl. Opt. 1972. V. 11, N 2. P. 239–243.
7. *Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.
8. *Van Dinther D., Hartogensis O.K., Holtslag A.A.M.* Runway Wake Vortex, Crosswind, and Visibility Detection with a Scintillometer at Schiphol Airport // Bound.-Lay. Meteorol. 2015. V. 157, iss. 3. P. 481–499.
9. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Гордеев Е.В., Маракасов Д.А., Сухарев А.А., Фалиц А.В.* Верификация корреляционного пассивного оптического измерителя поперечной скорости ветра в экспериментах с доплеровским ветровым лидаром // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 8. С. 657–663; *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Gordeev E.V., Marakasov D.A., Sukharev A.A., Falits A.V.* Verification of a passive correlation optical crosswind velocity meter in experiments with a Doppler wind lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 6. P. 574–580.
10. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Оценивание интегральной скорости ветра и турбулентности в атмосфере по искажениям видеоизображений естественно освещенных объектов // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 285–293; *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P.* Estimation of the integral wind velocity and turbulence in the atmosphere from distortions of optical images of naturally illuminated objects // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 422–430.
11. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А.* Сравнительные оценки скорости поперечного ветра из

- оптических и акустических измерений в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 8. С. 651–657; *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Marakasov D.A.* Comparative assessments of the cross-wind speed from optical and acoustic measurements in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 43–48.
12. *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Marakasov D.A., Rostov A.P.* Field tests of a passive optical meter of the structure characteristic of refractive index // *Proc. SPIE*. 2017. V. 10466. DOI: 10.1117/12.2287118.
13. *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами*. М. Абрамовиц, И. Стиган (ред.). М.: Наука, 1979. 832 с.
14. *Лукин В.П.* Адаптивная система формирования лазерных пучков в атмосфере, использующая некогерентные изображения в качестве опорных источников // *Оптика атмосфер. и океана*. 2013. Т. 26, № 2. С. 175–181; *Lukin V.P.* Adaptive system for the formation of laser beams in the atmosphere by use of incoherent images as reference sources // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 4. P. 345–351.

*A.L. Afanasiev, V.A. Banakh, D.A. Marakasov.* **Monitoring of wind conditions and indication of wake tracks in the area of the airport runway by the passive optical method.**

The wind speed and atmospheric turbulence in the airport runway were measured using a passive optical method based on the correlation analysis of turbulent distortions of distant objects of observation. The optical path was organized in the area of the ground section of the plane descent glidepath near the start of the runway. After the aircraft passed above the line of sight of the meter, significant velocity emissions and increased turbulence, caused by the wake, against the background of a moderate side wind were stably recorded. The results indicate the practical applicability of this method for instrumental indication of the presence or absence of wake vortex tracks over the airport. This information can be useful in assessing the safe intervals in the process of organizing departure and landings of aircraft.