

# Структура порывов ветра в приземном слое атмосферы

В.А. Гладких, И.В. Невзорова, С.Л. Одинцов\*

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

Поступила в редакцию 22.02.2019 г.

Представлены результаты анализа структуры сильных порывов ветра в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией и естественным ландшафтом. Используются экспериментальные данные, полученные с помощью ультразвуковых анемометров-термометров на высотах 5 и 10 м (естественный ландшафт) и 17 м (урбанизированная территория) над уровнем подстилающей поверхности. Проведена оценка вкладов продольной и ортогональной составляющих в порывы ветра. Выявлено, что непосредственно в порывах ветра имеет место некоторое преимущество движений вправо от основного потока и сверху вниз.

*Ключевые слова:* порывы ветра, приземный слой, турбулентность; wind gusts, surface layer, turbulence.

## Введение

Изучение поля ветра в различных условиях — важная задача при исследовании динамических процессов в атмосфере. Одним из элементов потока ветра являются области, где скорость движения может существенно, но относительно кратковременно превышать среднюю скорость, т.е. содержать порывы. Особенно актуальны изучение и прогноз порывов ветра для приземного слоя атмосферы, где они могут приводить к катастрофическим последствиям. Систематизация и детальный анализ таких эпизодов позволяют выявить особенности структуры порывов в тех или иных условиях что в перспективе поможет улучшить качество их прогноза. Определенный интерес представляет соотношение вкладов в порывы ветра продольного (вдоль основного потока) и ортогонального (в плоскости, перпендикулярной основному потоку) компонентов полного вектора ветра. Ранее нами был исследован коэффициент порывистости в приземном слое атмосферы [1] и его особенности в разных пунктах наблюдений в различные сезоны года. Результаты [1] были получены по тому же экспериментальному материалу, который будет обсуждаться далее. В этой связи представленный в статье материал является продолжением цикла наших работ по изучению порывистости потока ветра в приземном слое атмосферы.

Основная цель исследования — оценка и сопоставление вкладов продольной и ортогональной составляющих в полный вектор ветра во время его сильных порывов.

## Материалы и методы исследования

Исходными для анализа являются результаты работы ультразвуковых метеостанций (УЗМ) «Метео-2» [2] за период с января по июль 2018 г. (включительно) в разных пунктах наблюдений на высотах 5, 10 и 17 м над уровнем подстилающей поверхности. Первый пункт наблюдения (естественный ландшафт) находился на территории Базового экспериментального комплекса («БЭК») Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН в пригороде Томска. Одновременно работали две УЗМ, размещенные на одной мачте на высотах 5 и 10 м. Далее полученные в данном пункте на указанных высотах результаты будут обозначаться как «БЭК-5» и «БЭК-10». Второй пункт наблюдения находился на крыше лабораторного корпуса ИОА СО РАН на высоте 17 м над уровнем подстилающей поверхности (5 м от уровня крыши). Данный пункт наблюдений (далее «Томск») расположен на окраине г. Томска, и его можно характеризовать как урбанизированную территорию (территория Академгородка).

Измерения «мгновенных» значений метеорологических характеристик в приземном слое производились круглосуточно 10–11 раз в секунду. Регистрировались температура и относительная влажность воздуха, атмосферное давление и ортогональные составляющие полного вектора ветра. При измерении компонентов вектора ветра использовалась система координат, ориентированная по сторонам света: составляющая  $V_x$  — вдоль оси «юг–север», составляющая  $V_y$  — вдоль оси «восток–запад», составляющая  $V_z$  — вдоль вертикальной оси. На их основе можно определить полный вектор ветра, модуль которого рассчитывается по формуле  $V_f = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ . В свою очередь, модуль горизонтальной скорости ветра  $V_h = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ .

\* Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

При изучении порывов мы использовали переход от составляющих  $V_x$  и  $V_y$  к продольному  $U$  и поперечному  $V$  ветру. Этот переход осуществлялся с использованием формул [3]:

$$U(t) = V_x(t)\cos\bar{\varphi} + V_y(t)\sin\bar{\varphi}, \quad (1)$$

$$V(t) = V_y(t)\cos\bar{\varphi} - V_x(t)\sin\bar{\varphi},$$

где  $\bar{\varphi}$  — среднее направление горизонтального ветра за промежутки времени  $\Delta t$ , который далее называется интервалом обработки. Зависимость от времени  $t$  подчеркивает, что данные величины являются «мгновенными» значениями (в отличие от среднего значения  $\bar{\varphi}$  за интервал обработки  $\Delta t$ ). Поперечная составляющая определяется проекцией полного вектора ветра на ось в горизонтальной плоскости, перпендикулярную к продольному направлению. Знак «плюс» поперечной составляющей соответствует отклонению влево от направления основного потока, а знак «минус» — отклонению вправо. Вертикальная составляющая — проекция полного вектора ветра на вертикальную ось (знак «плюс» — движение вверх, знак «минус» — движение вниз).

В терминах  $U$ ,  $V$  и  $V_z$  модуль полного вектора ветра записывается в виде  $V_f = \sqrt{U^2 + V^2 + V_z^2}$ . Ортогональной составляющей будем считать величину  $V_{ort} = \sqrt{V^2 + V_z^2}$ , т. е. модуль проекции полного вектора ветра на плоскость, перпендикулярную к основному (горизонтальному) направлению ветрового потока. Ортогональную составляющую можно рассматривать как «вихревой» компонент потока ветра в текущий момент времени. Понятно, что для «полной» скорости ветра выполняется цепочка равенств

$$V_f = \sqrt{U^2 + V_{ort}^2} = \sqrt{U^2 + V^2 + V_z^2} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}.$$

Основная цель нашей работы заключалась в оценке вкладов  $U$  и  $V_{ort}$  в величину  $V_f$ . Для этого использовались формулы

$$\alpha_U = 100 \frac{U^2}{V_f^2}, \quad \alpha_{ort} = 100 \frac{V_{ort}^2}{V_f^2}, \quad (2)$$

исходя из равенства  $1 = \frac{U^2}{V_f^2} + \frac{V_{ort}^2}{V_f^2}$ . Величины  $\alpha_U$

и  $\alpha_{ort}$  (%) характеризуют относительный вклад соответственно продольной и ортогональной составляющих в модуль полного вектора ветра. Прежде чем перейти к анализу  $\alpha_U$  и  $\alpha_{ort}$ , учтем рекомендации (см., например, [4, 5]), касающиеся необходимости предварительного усреднения «мгновенных» значений  $U$ ,  $V$  и  $V_z$  за некоторый промежуток времени  $\tau \ll \Delta t$ . Такое усреднение («внутреннее» усреднение) минимизирует, в частности, влияние пульсаций компонентов вектора ветра, присутствующих лишь небольшим объемом движущейся атмосферы (мелкомасштабная турбулентность в нашем случае не представляет особого интереса). Напомним, что «мгновенные» значения компонентов вектора ветра измерялись с периодом порядка 10 раз в секунду. В дальнейшем рассматриваются результаты, полученные для  $\Delta t =$

$= 10$  мин и  $\tau = 1$  и 3 с. При этом в оценках по формулам (2) вместо компонентов  $U$ ,  $V$  и  $V_z$  используются их усредненные за интервал  $\tau$  значения  $\bar{U}$ ,  $\bar{V}$  и  $\bar{V}_z$ , а также оценки  $\bar{V}_f = \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2 + \bar{V}_z^2}$  и  $\bar{V}_{ort} = \sqrt{\bar{V}^2 + \bar{V}_z^2}$  вместо  $V_f$  и  $V_{ort}$ .

## Результаты исследования и их обсуждение

Поскольку основным объектом нашего анализа являются порывы ветра со значительными скоростями, то из всего набора экспериментальных данных мы использовали лишь те эпизоды (дни измерений), когда значения  $\bar{V}_f$  превышали уровень 99,5% интегральных функций распределения  $F$ , полученных за месяц измерений. Примеры этих функций для пунктов «Томск» и «БЭК-10» в марте 2018 г. приведены на рис. 1 (звездочками отмечены уровни 99,5%; ось ординат имеет разрыв). Вычисления проведены при  $\tau = 1$  с.

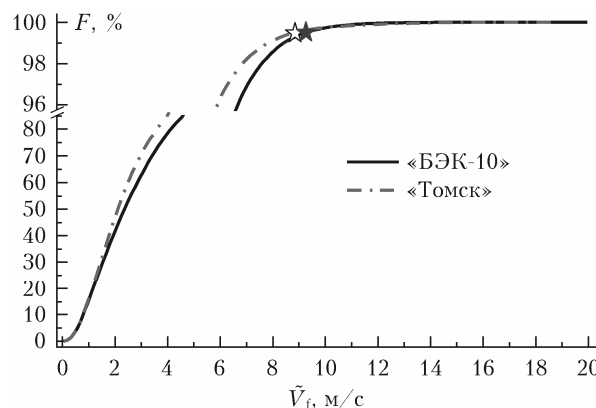


Рис. 1. Интегральные функции распределения скорости ветра в марте 2018 г. в пунктах наблюдения «БЭК-10» и «Томск»

В дальнейший анализ включались только те дни, когда порывы ветра с превышением уровня 99,5% реализовывались одновременно во всех пунктах наблюдения и в течение одних суток составляли в каждом пункте суммарно не менее 30 мин. В январе—июле 2018 г. такие условия выполнялись только в 12 эпизодах (12 сут). Подобная селекция экспериментальных данных исключает из рассмотрения кратковременные и локальные (только в отдельных пунктах) события.

Рассмотрим подробно один типичный эпизод с наличием порывов ветра. Для этого воспользуемся результатами измерений в пункте «БЭК-10» 24.03.2018 г. На рис. 2, а показана суточная развертка величины  $V_f$  (при  $\Delta t = 10$  мин,  $\tau = 1$  с) с наложенным на нее графиком средних (за 10 мин) значений модуля горизонтального ветра  $\bar{V}_h$ .

Согласно приведенным на рис. 1 результатам значительные порывы ветра (более 9,25 м/с) в основном имели место во второй половине дня. Суточные развертки рассчитанных для этого эпизода

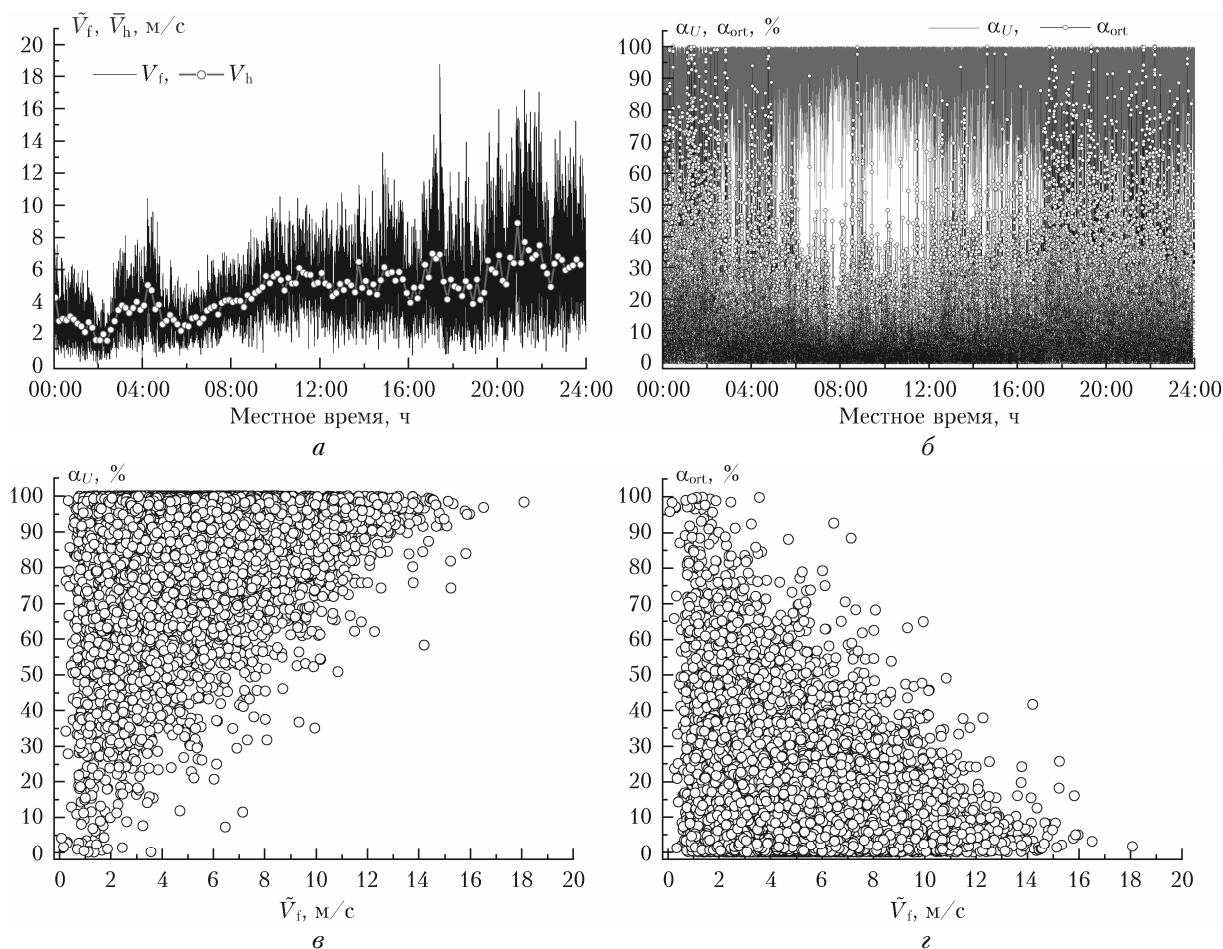


Рис. 2. Суточные развертки «полной» скорости ветра и ее горизонтальной составляющей (а) и вкладов продольной и ортогональной составляющих (б); зависимость вкладов продольной (в) и ортогональной (г) составляющих от скорости ветра («БЭК-10» 24.03.2018 г.)

величин  $\alpha_U$  и  $\alpha_{ort}$  показаны на рис. 2, б. Обращает на себя внимание тот факт, что значительные вклады ортогонального компонента  $\tilde{V}_{ort}$  в «полный» ветер  $\tilde{V}_f$  могут происходить как при относительно небольших скоростях ветра (до 06:00), так и во время сильных порывов (после 17:00). Без дополнительных иллюстраций отметим, что данный вывод справедлив не только для приведенного эпизода, но и для других рассмотренных нами случаев (дней с сильными порывами ветра).

Возникает вопрос, каковы вклады  $\tilde{V}_{ort}$  и  $\tilde{U}$  в «полную» скорость  $\tilde{V}_f$  во время сильных порывов? Отчасти на этот вопрос дает рис. 2, в, г, где показаны значения  $\alpha_U$  и  $\alpha_{ort}$  в зависимости от  $\tilde{V}_f$ : чем больше значение  $\tilde{V}_f$ , тем меньше вклад (относительный) в него ортогональных составляющих  $\tilde{V}_{ort}$ , т.е. непосредственно в порывах основную роль играет скорость продольного ветра  $\tilde{U}$ . Следовательно, заметные вклады  $\tilde{V}_{ort}$  в  $\tilde{V}_f$ , которые наблюдаются на рис. 2, б после 17:00, имеют место только вне порывов ветра.

Отсюда следует еще один вопрос: насколько отличаются значения  $\tilde{V}_{ort}$  во время порывов ветра и вне их? Проведенный анализ показал, что с ростом скорости ветра имеется тенденция к увеличению ортогонального компонента  $\tilde{V}_{ort}$ . Однако его увели-

чение в порывах не столь велико, как продольной скорости  $\tilde{U}$ . Поэтому относительный вклад  $\tilde{V}_{ort}$  во время сильных порывов уменьшается по сравнению с вкладом  $\tilde{U}$ . Примером могут служить два 10-минутных фрагмента с развертками  $\tilde{U}$  и  $\tilde{V}_{ort}$ , приведенные на рис. 3, а. Зависимость величины  $\tilde{V}_{ort}$  от  $\tilde{V}_f$  (суммарно по двум фрагментам) показана на рис. 3, б.

Мы подробно рассмотрели один эпизод (одни сутки) с присутствием сильных порывов ветра на высоте 10 м в условиях естественного ландшафта. Сделанные на основе этого эпизода выводы можно распространить и на другие аналогичные случаи. По результатам обработки экспериментальных данных за период с января по июль 2018 г. установлено, что взаимосвязь  $\alpha_U$  и  $\alpha_{ort}$  с «полной» скоростью ветра  $\tilde{V}_f$  в условиях сильных порывов практически идентична представленной на рис. 2, в, г. Без дополнительных иллюстраций укажем, что и на высоте 5 м в пункте наблюдения «БЭК» выполняются аналогичные закономерности. При этом на высоте 5 м в среднем значения  $\tilde{V}_{ort}$ ,  $\tilde{U}$  и  $\tilde{V}_f$  меньше, чем на высоте 10 м. В то же время в порывах ветра  $\alpha_{ort}$  на высоте 5 м несколько больше, чем на высоте 10 м. В условиях урбанизированной территории вклад

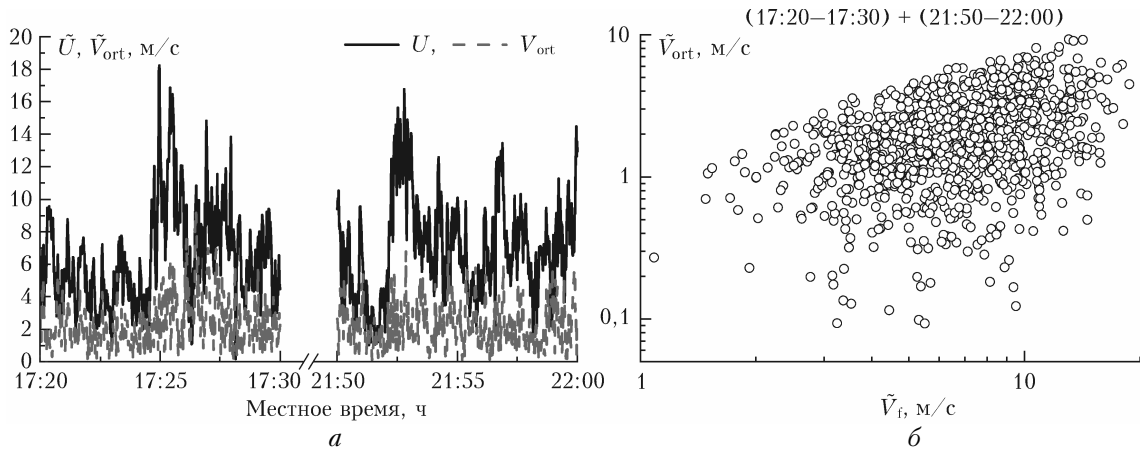


Рис. 3. Фрагменты измерений продольной и ортогональной составляющих «полного» ветра (а); зависимость ортогональной составляющей от «полного» ветра (б) («БЭК-10», 24.03.2018 г.)

ортогональной составляющей  $\alpha_{ort}$  в «полную» скорость ветра  $\tilde{V}_f$  заметно увеличивается. Однако, как и в случае естественного ландшафта, скорость в порывах ветра определяется в основном продольной составляющей  $\tilde{U}$ . Проиллюстрируем данный вывод типичными примерами на рис. 4, где показаны зависимости  $\alpha_U(\tilde{V}_f)$  и  $\alpha_{ort}(\tilde{V}_f)$  для двух различных дней с порывами ветра в пунктах наблюдения «Томск» и «БЭК-5» (на рисунке представлены прореженные «облака» точек).

Результаты получены при  $\Delta t = 10$  мин и  $\tau = 3$  с. Графики  $\alpha_U(\tilde{V}_f)$  и  $\alpha_{ort}(\tilde{V}_f)$  наглядно иллюстрируют факт увеличения вкладов  $\tilde{V}_{ort}$  в «полный» ветер  $\tilde{V}_f$  на урбанизированной территории по сравнению с естественным ландшафтом. Отметим также, что в целом порывы ветра (максимальные значения  $\tilde{V}_f$ ) в пункте «Томск» несколько меньше, чем в пункте «БЭК». Представленные результаты позволяют сделать обобщенный вывод относительно вклада ортогональной («вихревой») составляющей в сильные

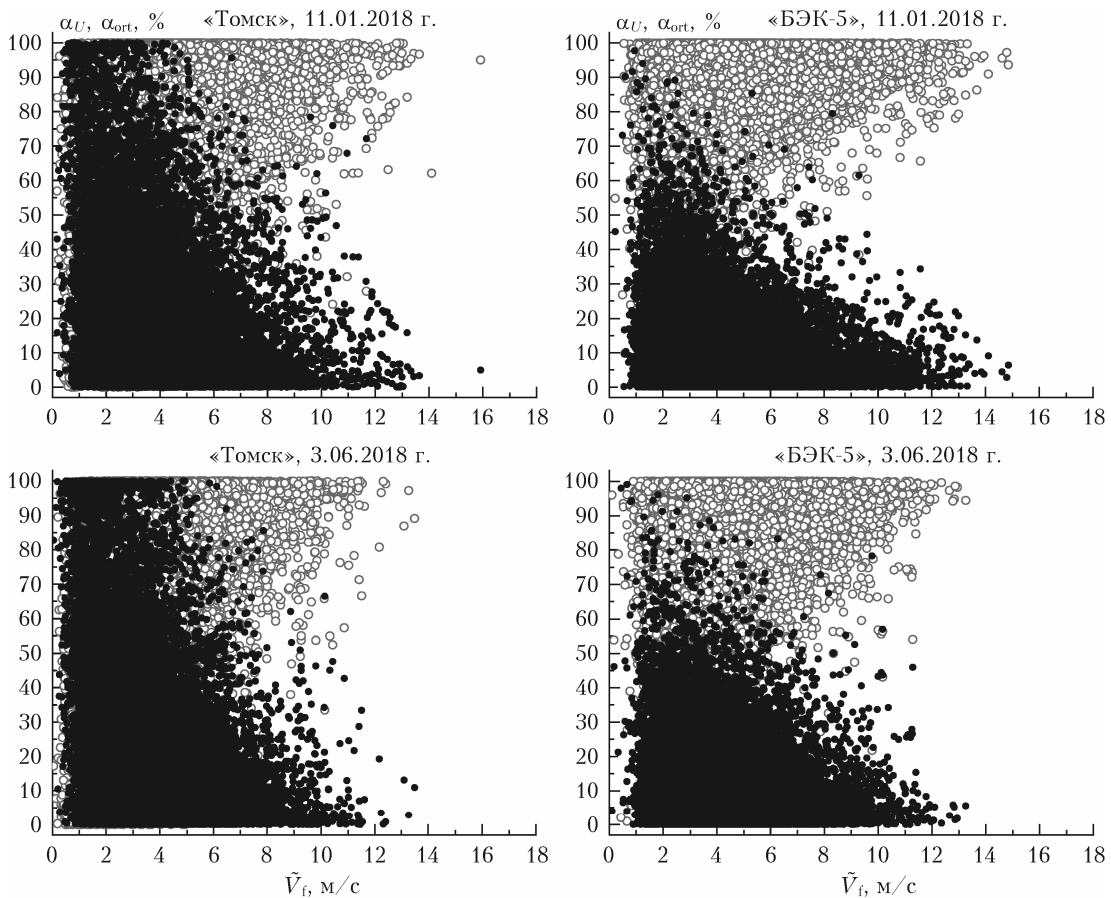


Рис. 4. Зависимость вкладов продольной (белые точки) и ортогональной (черные точки) составляющих от «полного» ветра в разные дни в пунктах наблюдений

порывы ветра. Эта составляющая ( $\tilde{V}_{\text{ort}}$ ) несколько возрастает в порывах, но «сила» порыва в основном определяется продольным ветром. Данный вывод справедлив во все сезоны года как в условиях естественного ландшафта, так и для урбанизированной территории.

Основной анализ структуры порывов ветра был проведен с использованием оценок ортогональной составляющей вектора ветра  $\tilde{V}_{\text{ort}} = \sqrt{\tilde{V}^2 + \tilde{V}_z^2}$ . Естественно, возникает вопрос о том, каковы вклады поперечной  $\tilde{V}$  и вертикальной  $\tilde{V}_z$  составляющих вектора ветра в величину  $\tilde{V}_{\text{ort}}$ . Без иллюстраций отметим, что в период сильных порывов в пункте «БЭК» основной вклад в  $\tilde{V}_{\text{ort}}$  делает поперечный ветер — от 80 до 100%. В пункте «Томск» вклад  $\tilde{V}$  в  $\tilde{V}_{\text{ort}}$  несколько меньше (от 60 до 100%), но все же в большинстве случаев заметно превышает вклад  $\tilde{V}_z$ .

Еще один нюанс, касающийся структуры порывов ветра, связан со знаками компонентов  $\tilde{V}$  и  $\tilde{V}_z$ , формирующих ортогональную составляющую  $\tilde{V}_{\text{ort}}$ . Он интересен в первую очередь для естественного ландшафта с относительно ровной подстилающей поверхностью (к которому можно отнести пункт наблюдения «БЭК»). В этом случае структуру сильных порывов формируют непосредственно «внутренние» особенности потока ветра. Краткий анализ показал, что в период порывов среднее (и медианное) значение компонента  $\tilde{V}$  смещается в область отрицательных значений (преимущественное поперечное движение вправо от основного потока). В «обычных» же условиях (без порывов) распределение  $\tilde{V}$  симметрично относительно нуля, как и должно быть для поперечной составляющей горизонтального ветра. В свою очередь, среднее (и медианное) значение вертикального компонента  $\tilde{V}_z$  в периоды порывов ветра также смещается в отрицательную область (некоторое преимущество нисходящих движений). В «обычных» условиях среднее (и медианное) значение  $\tilde{V}_z$  близко к нулю. Эти выводы сделаны по результатам измерений в пункте «БЭК» (на высотах 5 и 10 м). Подобные закономерности отмечались, например, в работе [6] при изучении ортогональных компонентов в порывах ветра (при  $\tau = 3$  с и  $\Delta t = 10$  мин). Отмеченные особенности косвенно подтверждают, что поток ветра с порывами может содержать в себе когерентные структуры [7]. Подробное исследование указанных закономерностей является отдельной задачей и в рамках данной работы не проводилось.

Также необходимо отметить, что увеличение интервала  $\Delta t$  приводит к некоторому изменению значений  $\tilde{V}_{\text{ort}}$  и его вкладов  $\alpha_{\text{ort}}$  в порывы ветра. Но это изменение несущественно, и сделанные ранее общие выводы о структуре порывов ветра оста-

ются справедливыми. В свою очередь, увеличение интервала «внутреннего» усреднения  $\tau$  несколько уменьшает значения компонентов  $\tilde{U}$ ,  $\tilde{V}$ ,  $\tilde{V}_{\text{ort}}$  и, естественно, значение  $\tilde{V}_f$ . Оптимальная комбинация величин  $\Delta t$  и  $\tau$  должна определяться, по нашему мнению, исходя из конкретно решаемых задач и используемого для измерения ветра оборудования.

## Заключение

Подводя итог, можно сделать следующие выводы относительно структуры сильных порывов ветра в приземном слое атмосферы. Основной вклад в порывы вносит скорость продольного ветра. Ортогональная составляющая (проекция полного вектора ветра на плоскость, перпендикулярную основному потоку) в сильных порывах хоть и увеличивается по сравнению с вкладом при средних значениях скорости ветра, но в меньшей степени, чем продольный ветер. При этом над естественным ландшафтом вклад ортогональной составляющей на высоте 5 м несколько больше, чем на высоте 10 м. В свою очередь, над урбанизированной территорией вклад ортогональной составляющей порывов ветра больше, чем над территорией с естественным ландшафтом. Установлено, что непосредственно в сильных порывах имеет место некоторое преимущество движений вправо от основного потока и сверху вниз. Сделанные выводы справедливы для всех сезонов года (в рамках периода измерений).

Измерения выполнялись с помощью оборудования ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН.

1. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Статистика коэффициента порывистости ветра в приземном слое атмосферы // *Успехи совр. естеств.* 2018. № 11. С. 96–102.
2. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы.* 2009. № 7. С. 21–25.
3. *Федоров В.А.* К измерению содаром параметров продольных и поперечных компонент горизонтальной скорости ветра // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16, № 10. С. 913–920.
4. *Курбатова М.М., Рубинштейн К.Г.* Гибридный метод прогноза порывов ветра // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 7. С. 523–529.
5. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 264 с.
6. *Miller C., Balderrama J.-A., Masters F.* Aspect of observed gust factors in landfalling tropical cyclones: Gust components, terrain, and upstream fetch effects // *J. Bound.-Lay. Meteorol.* 2015. V. 155, N 1. P. 129–155. DOI: 10.1007/s10546-014-9989-0.
7. *Zeng Q., Cheng X., Hu F., Peng Z.* Gustiness and coherent structure of strong winds and their role in dust emission end entrainment // *Adv. Atmos. Sci.* 2010. V. 27, N 1. P. 1–13.

*V.A. Gladkikh, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. Structure of wind gusts in the surface air layer.*

The structure of strong wind gusts in the surface air layer over an urban territory and a natural landscape is analyzed. Experimental data obtained with ultrasonic anemometers-thermometers at altitudes of 5 and 10 m (natural landscape) and 17 m (urban territory) above the surface have been examined. Contributions of the longitudinal and transverse components to wind gusts have been estimated. Motions to the right from the main flow and from top down have been found to predominate somewhat in wind gusts.