

УДК 551.551

**СТАТИСТИКА КОЭФФИЦИЕНТА ПОРЫВИСТОСТИ ВЕТРА
В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ****Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.***Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, e-mail: glvl@iao.ru*

В статье обсуждается статистика коэффициента порывистости ветра в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией и над естественным ландшафтом. Для анализа использовались результаты работы ультразвуковых анемометров-термометров, размещавшихся на высотах 5 и 10 м (естественный ландшафт) и 17 м (урбанизированная территория) над уровнем подстилающей поверхности. Измерения проводились непрерывно с частотой получения данных 10–11 Гц. Регистрировались три ортогональных компонента вектора ветра, температура и относительная влажность воздуха, а также атмосферное давление. Результаты анализа подтвердили достаточно очевидный факт, что коэффициенты порывистости над урбанизированной территорией больше, чем над естественным ландшафтом. Рассмотрен сезонный и суточный ход коэффициента порывистости. Установлено, что его сезонный ход (изменение среднемесячного значения) практически отсутствует. Это характерно в первую очередь для урбанизированной территории. Средний суточный ход коэффициента порывистости (для каждого месяца отдельно) достаточно хорошо выражен в летние месяцы и практически отсутствует в холодное время года. Кратко рассмотрена его взаимосвязь со средней (за интервал обработки) скоростью ветра. Выявлено, что возможны случаи, когда коэффициент порывистости может иметь большое значение при относительно слабом ветре в порывах. И наоборот – при относительно небольших коэффициентах порывистости могут иметь место сильные порывы ветра. При этом выделено два различных режима порывов – «быстрые» (частое повторение порывов) и «медленные» (между сильными порывами существуют области с некоторым ослаблением среднего потока ветра). Кратко рассмотрена взаимосвязь коэффициента порывистости с вертикальным турбулентным потоком тепла, который может служить признаком типа текущей стратификации приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: порывы ветра, приземный слой, турбулентность**WIND GUST STATISTICS IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER****Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L.***V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, e-mail: glvl@iao.ru*

The statistics of the wind gustiness factor in the surface atmospheric layer over an urban territory and natural landscape is discussed. The findings of ultrasonic anemometers-thermometers installed at heights of 5 and 10 m (natural landscape) and 17 m (urban territory) above the underlying surface were used for the analysis. Measurements were conducted continuously with the data output rate of 10–11 Hz. Three orthogonal components of the wind vector, temperature and relative humidity of air, and atmospheric pressure were measured. The results of the analysis have confirmed the rather obvious fact that the gustiness factor over an urban territory is higher than that over the natural landscape. The seasonal and diurnal dynamics of the gustiness factor was studied. It was found that the seasonal dynamics (variation of the monthly average value) is practically absent. This is characteristic, in the first turn, of the urban territory. The diurnal average dynamics of the gustiness factor (for every month separately) is quite pronounced in the summer months and nearly absent in the cold season. Its correlation with the average (for the processing period) wind velocity was briefly considered. It was found that in some situations the gustiness factor can be rather large at the relatively slight wind in gusts and, to the contrary, big wind gusts may occur at the relatively low gustiness factors. Two different gustiness modes were revealed: fast (frequently occurring) gusts and slow gusts (intervals with somewhat weaker mean wind flow existing between big gusts). The relation of the gustiness factor with the vertical turbulent heat flux, which can serve as an indicator of current stratification of the atmospheric surface layer, is briefly analyzed.

Keywords: wind gusts, surface layer, turbulence

Одной из важных задач динамической метеорологии является изучение и возможность прогнозирования порывов ветра в приземном слое атмосферы. Актуальность решения данной проблемы определяется в том числе ее практической значимостью в различных областях хозяйственной деятельности. Исследованию порывов ветра посвящено большое число публикаций как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Например, в работе [1] рассмотрено несколько вариантов прогноза порывов

ветра и обсуждается их оправдываемость. Там же имеется и краткий обзор литературы по данной проблеме. Одним из возможных предикторов при прогнозировании порывов ветра в работе [1] используется величина кинетической энергии турбулентности в комбинации со средней скоростью ветра. Поэтому изучение вариаций этой комбинации при различных условиях представляет безусловный интерес.

Цель исследования. Как отмечалось выше, одним из возможных предикторов

порывов ветра в приземном слое атмосферы может служить величина [1]

$$G = \overline{V}_h + 3 \cdot \sqrt{E}, \quad (1)$$

где \overline{V}_h – средняя скорость горизонтального ветра (м/с), $V_h = \sqrt{u^2 + v^2}$ – «мгновенная» скорость горизонтального ветра, u и v – «мгновенные» (случайные) значения продольной и поперечной составляющих горизонтального ветра соответственно (м/с), $E = 0,5 \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$ – кинетическая энергия турбулентности ($\text{м}^2/\text{с}^2$), $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$ – дисперсии турбулентных составляющих соответственно продольного, поперечного и вертикального ветра ($\text{м}^2/\text{с}^2$). Средняя скорость ветра \overline{V}_h , а также дисперсии компонентов вектора ветра вычисляются по одному и тому же интервалу времени Δt . При общем анализе порывов целесообразно рассматривать нормированную величину

$$k = G / \overline{V}_h = 1 + 3 \cdot \sqrt{E} / \overline{V}_h, \quad (2)$$

которую можно назвать коэффициентом порывистости [2]. Именно коэффициент порывистости являлся основной целью наших исследований. Была поставлена задача оценить величины и исследовать зависимость этого коэффициента от места и высоты измерений в приземном слое атмосферы, от сезона года и времени суток.

Материалы и методы исследования

Исследование коэффициента порывистости основывалось на экспериментальных данных, полученных с помощью ультразвуковых анемометров-термометров (ультразвуковых метеостанций – далее УЗМ) «Метео-2» [3]. Для анализа использовались измерения, полученные за период с января по июль 2018 г. (включительно) на территории обсерватории Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН «Базовый экспериментальный комплекс – БЭК») в пригороде Томска. Эта территория (естественный ландшафт) характеризуется большой открытой площадью с травяным покрытием, окруженной лесопосадками (на удалении порядка 100 м) не очень большой высоты (до 10 м). 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». Кроме того, для анализа были использованы результаты работы УЗМ «Метео-2», размещенной на крыше лабораторного корпуса ИОА СО РАН на высоте 12 м от подстилающей поверхности (5 м от

уровня крыши). Данный пункт наблюдений («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 в зависимости от конкретного экземпляра УЗМ.

Прежде чем приступить к анализу полученных результатов, следует обратить внимание на некоторые методические аспекты, касающиеся обработки экспериментальных данных. Вычисление продольного и поперечного компонентов горизонтального ветра, включая средние значения и пульсационные составляющие, проводилось с использованием скользящих средних с «временным окном» δt , как это изложено в работе [4]. Важность корректного выделения турбулентных составляющих для достоверной оценки характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы и оправданность применяемой для этого методики мы уже отмечали в работе [4] при исследовании внешних масштабов турбулентности. Представленные далее материалы получены при $\delta t = 5$ мин и $\Delta t = 10$ мин. Величина $\Delta t = 10$ мин является достаточно типичным интервалом обработки (см., например, [1]). Задание «скользящего окна» размером $\delta t = 5$ мин обусловлено стремлением сохранить в обрабатываемых выборках относительно медленные вариации компонентов вектора ветра, предшествующие порывам ветра. Хотя это может несколько завязать значения дисперсий этих компонентов по сравнению со случаем применения более узкого «окна» δt . Необходимо также отметить, что формула (1) справедлива, как это указано в [1], для случая нормального закона распределения скорости ветра. Однако проведенный нами анализ показал, что этому закону в целом удовлетворяют только поперечная (v) и вертикальная (w) составляющие вектора ветра. В то же время модуль скорости (V_h) и продольная составляющая (u) в основном стремятся к логарифмически-нормальному закону распределения. Тем не менее в дальнейшем для анализа нами все же используется формула (1), точнее, полученная на ее основе формула (2).

Результаты исследования и их обсуждение

Поскольку динамические процессы в приземном слое атмосферы характеризуются большим разнообразием, то их из-

учение вполне естественно проводить с использованием статистического анализа. В представленном далее материале основные результаты будут изложены в виде графиков с соответствующими комментариями и выводами. Прежде всего, приведем примеры разверток во времени коэффициентов порывистости в пунктах «БЭК-5» и «Томск» для всего периода проводившихся наблюдений (рис. 1, а, б). В дальнейшем коэффициенты порывистости будут обозначаться: k_5 для случая «БЭК-5», k_{10} – для случая «БЭК-10», k_T – для случая «Томск». Аналогичные индексы применяются и для других оценок.

Для случая «БЭК-10» коэффициент порывистости k_{10} имеет практически идентичный развертке k_5 вид. Отличия имеются только для небольших значений этих коэффициентов. Это хорошо заметно при сравнении гистограмм распределения k_5 и k_{10} , рассчитанных для всего периода измере-

ний с шагом 0,1 и приведенных на рис. 1, в (обозначены соответственно p_5, p_{10}). В свою очередь коэффициент порывистости k_T для пункта «Томск» заметно отличается от коэффициентов k_5 и k_{10} как по величине, так и по форме гистограммы p_T (близкой к нормальному закону распределения). В качестве дополнительной информации на рис. 1, г, приведены графики интегрального распределения коэффициентов k_5, k_{10} и k_T (обозначены соответственно F_5, F_{10} и F_T).

Приведенные на рис. 1 графики дают общее представление о коэффициентах порывистости в разные сезоны года, в разных по типу подстилающей поверхности пунктах наблюдения, на разных высотах. Более детальную информацию можно получить с помощью табл. 1, где представлены среднемесячные значения коэффициентов k_5, k_{10} и k_T , а также их медианы и среднеквадратические отклонения (СКО).

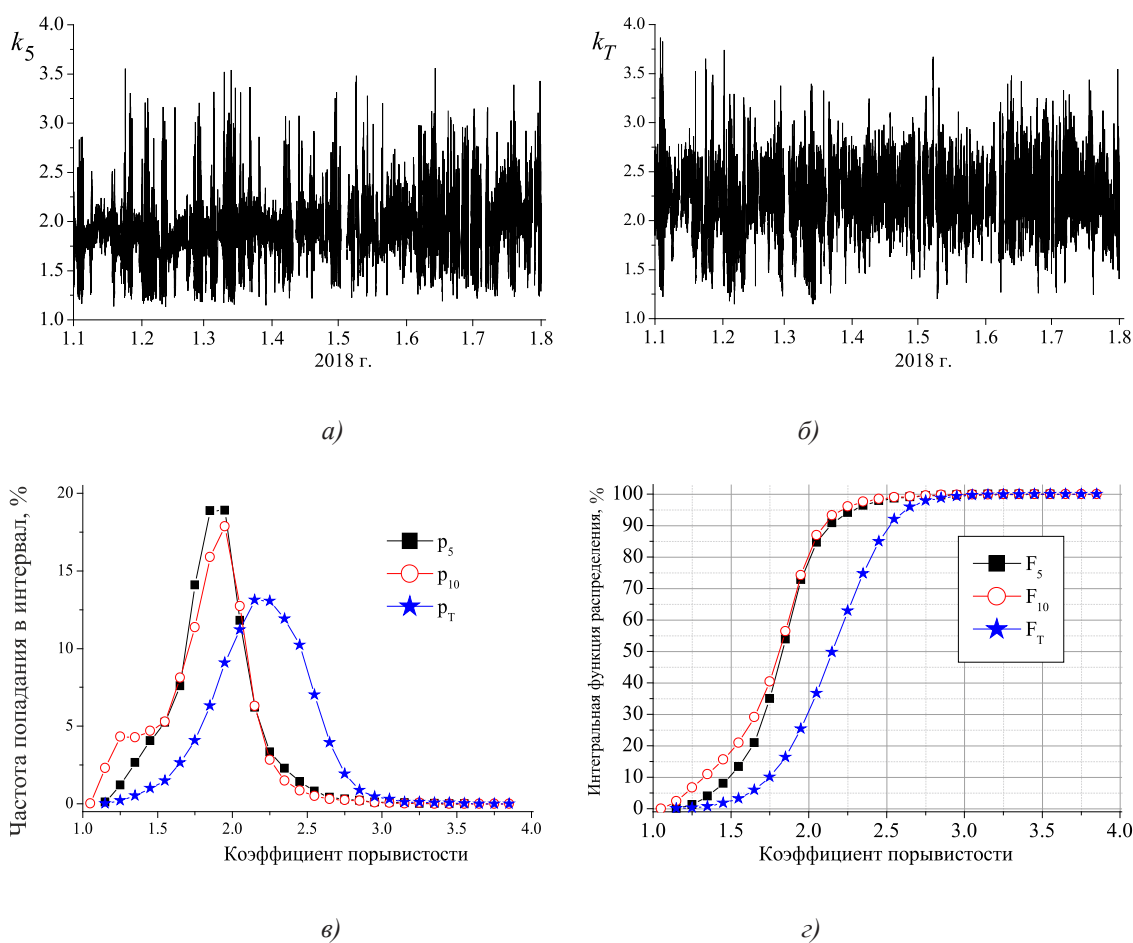


Рис. 1. Коэффициенты порывистости за период с января по июль 2018 г. в пунктах наблюдения «БЭК-5» (а) и «Томск» (б), а также нормированные гистограммы распределения (в) и интегральные функции распределения (г) для всех пунктов наблюдения

Таблица 1

Среднемесячные значения коэффициентов порывистости

2018 г.	БЭК-5 (k_5)		БЭК-10 (k_{10})		Томск (k_T)	
	Среднее / медиана	СКО	Среднее / медиана	СКО	Среднее / медиана	СКО
Январь	1,82 / 1,84	0,21	1,77 / 1,83	0,27	2,17 / 2,17	0,32
Февраль	1,73 / 1,75	0,25	1,66 / 1,69	0,32	2,14 / 2,17	0,35
Март	1,83 / 1,85	0,25	1,81 / 1,86	0,30	2,15 / 2,17	0,32
Апрель	1,89 / 1,89	0,21	1,89 / 1,93	0,29	2,25 / 2,25	0,27
Май	1,93 / 1,91	0,24	1,87 / 1,87	0,21	2,20 / 2,19	0,30
Июнь	1,95 / 1,95	0,27	1,88 / 1,90	0,29	2,25 / 2,25	0,30
Июль	2,03 / 2,03	0,31	1,89 / 1,92	0,32	2,21 / 2,20	0,29
Суммарно за период измерений	1,88 / 1,88	0,27	1,82 / 1,86	0,30	2,19 / 2,20	0,31

Согласно приведенной табл. 1 и графикам на рис. 1 можно констатировать очевидный факт, что во все сезоны года значения коэффициента порывистости в пункте «Томск» (урбанизированная территория) заметно превышают коэффициент порывистости в пункте с естественным ландшафтом. В свою очередь, сезонный ход средних значений коэффициентов порывистости просматривается только для территории с естественным ландшафтом и только для высоты 5 м. Хотя этот ход и не очень значим. Слабое различие коэффициентов k_5 и k_{10} объясняется, по-видимому, слишком малым разносом по высоте измерительных устройств. Однако функции распределения (как интегральные, так и «дифференциальные») это различие все же фиксируют. В целом средние значения коэффициента k_{10} несколько меньше коэффициента k_5 , что соответствует результатам, приведенным в [2]. Считаем полезным кратко рассмотреть суточный ход коэффициентов порывистости. На рис. 2 показаны результаты вычисления среднего суточного хода (ССХ) коэффициентов k_5 и k_T для двух зимних (январь и февраль) и двух летних (июнь и июль) месяцев 2018 г. Для января «полурезками» показаны значения СКО.

Согласно рис. 2 в зимние месяцы ССХ коэффициентов порывистости выражен слабо (или вообще отсутствует). Однако летом днем значения коэффициентов k_5 и k_T заметно выше, чем ночью. Отметим без дополнительных иллюстраций, что в зимние месяцы СКО при оценках ССХ коэффициентов порывистости в пункте «Томск» несколько превышают СКО в пункте «БЭК». В летние месяцы они примерно совпадают. Этот вывод подтверждает визуальное сравнение «флуктуаций» графиков на рис. 1, а, б.

Понятно, что величины коэффициентов порывистости во многом зависят от типа текущей стратификации, которая может «регулировать» пульсационные составляющие вектора ветра в приземном слое атмосферы. Анализ влияния стратификации на порывистость ветра в конкретных пунктах наблюдения составляет отдельный класс задач и в данной работе не проводится. Однако считаем полезным с помощью рис. 3 проиллюстрировать связь коэффициента порывистости (на примере результатов «БЭК-5») с вертикальным турбулентным потоком тепла Q_w (Вт/м²), который может характеризовать текущий тип стратификации. Рисунок построен по совокупности всех измерений за период январь – июль 2018 г. Отрицательные значения Q_w в целом характерны для устойчиво стратифицированного приземного слоя. Можно сделать вывод (достаточно очевидный), что повышенные значения коэффициентов порывистости имеют место в основном при неустойчивой и близкой к нейтральной стратификации приземного слоя атмосферы.

Отметим, что приведенные выше оценки коэффициентов порывистости в целом согласуются с результатами, опубликованными, например, в работах [2, 5, 6]. При этом следует учесть, что коэффициенты порывистости рассчитывались нами по «мгновенным» данным, т.е. по результатам измерений с частотой порядка 10 Гц, а в цитируемых работах применялось предварительное «внутреннее» усреднение «мгновенных» данных. Отметим также, что формы гистограмм коэффициента порывистости, опубликованные, например, в [6, 7] для разных пунктов наблюдений, в целом согласуются с формами гистограмм на рис. 1, в (с учетом замечания по поводу «внутреннего» усреднения).

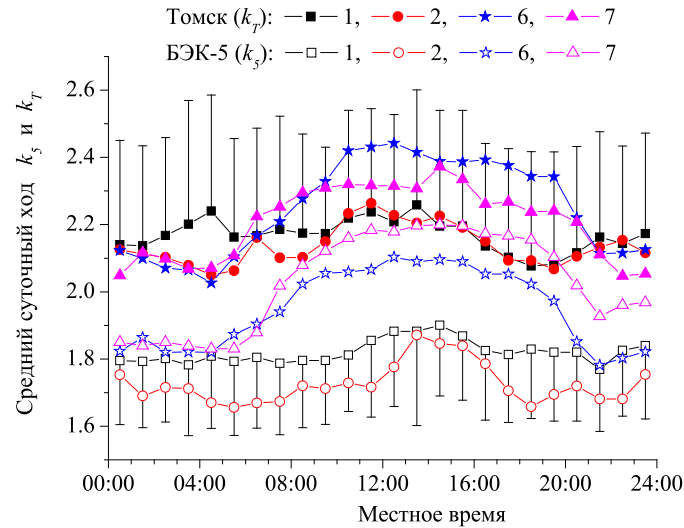


Рис. 2. Средний суточный ход коэффициентов порывистости для некоторых месяцев 2018 г. (указаны на графике) в пунктах наблюдения «БЭК-5» и «Томск»

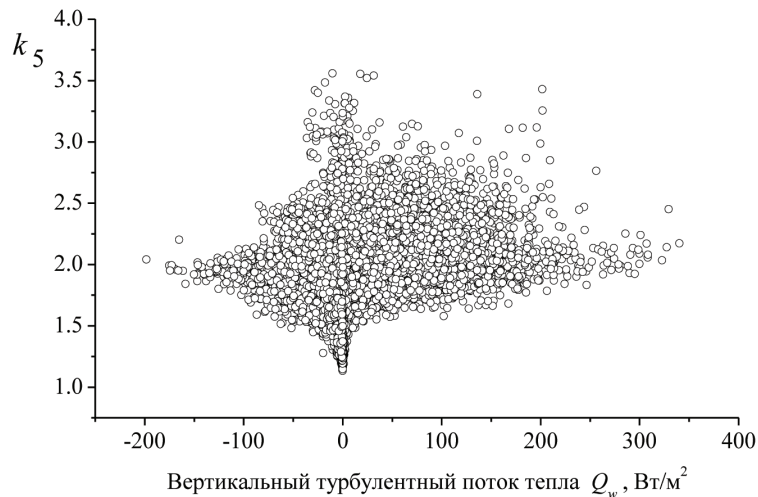


Рис. 3. Зависимость коэффициента порывистости от вертикального турбулентного потока тепла в пункте наблюдения «БЭК-5» за период наблюдения с января по июль 2018 г.

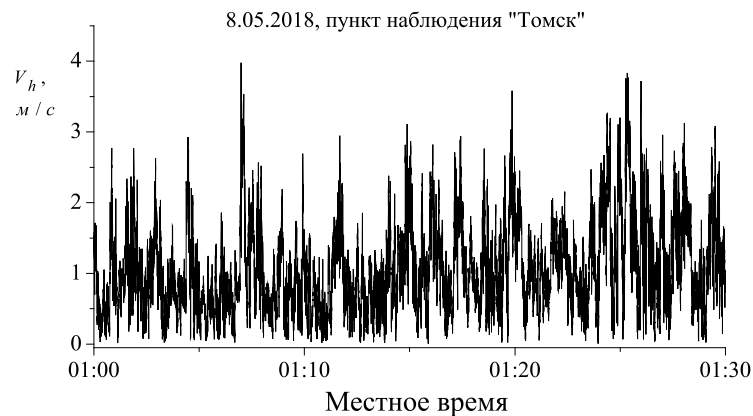


Рис. 4. Скорость горизонтального ветра в пункте наблюдения «Томск» с 01:00 до 01:30 местного времени 8.05.2018

Изложенный выше материал касался анализа коэффициента порывистости вне зависимости от величины среднего ветра на интервале обработки. Однако коэффициент порывистости может иметь большое значение при относительно слабом ветре. Для примера на рис. 4 приведен 30-минутный эпизод с разверткой «мгновенных» значений $V_h(t)$ в пункте наблюдения «Томск».

В это время имели место большие значения коэффициента порывистости k_T при относительно небольшой скорости в порывах ветра. В табл. 2 приведены значения k_T для трех 10-минутных интервалов, а также средние и максимальные значения скорости ветра на этих интервалах.

Таблица 2
Пункт наблюдения «Томск» 8.05.2018

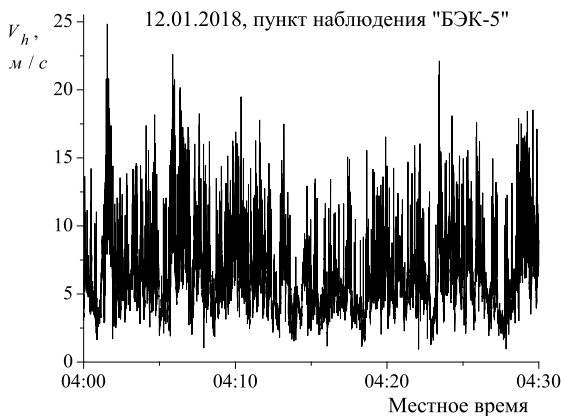
Интервал времени	Коэффициент порывистости k_T	Средняя скорость ветра, м/с	Максимальная скорость ветра, м/с
01:00–01:10	3,67	0,70	4,0
01:10–01:20	3,47	0,72	3,6
01:20–01:30	3,44	0,72	3,8

Естественно, что наиболее важными являются порывы ветра, способные нанести существенный ущерб при воздействии на природные или искусственные объекты. В этой связи считаем необходимым отметить, что могут реализовываться ситуации с не очень большими значениями коэф-

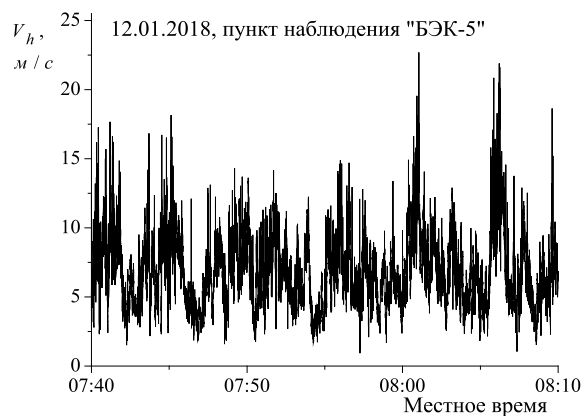
фициентов порывистости, но с большими порывами ветра. Для примера на рис. 5 приведены эпизоды с 30-минутными развертками «мгновенных» значений $V_h(t)$ в пункте наблюдения «БЭК-5» 12.01.2018. В этих эпизодах имели место большие порывы ветра при относительно небольших значениях k_5 . Подобные результаты были опубликованы, например, в [8].

В табл. 3 приведены значения k_5 для соответствующих 10-минутных интервалов времени, отображенных на рис. 5, а также средние и максимальные значения скорости ветра на этих интервалах. В рассматриваемых эпизодах значения k_5 можно отнести, согласно рис. 1, г, к случаю «несколько выше среднего уровня».

Два эпизода, приведенные на рис. 5, выбраны для иллюстрации еще одной особенности структуры порывов ветра. В первом случае (рис. 5, а) частота следования порывов достаточно высокая («быстрые» порывы), а во втором (рис. 5, б) между областями с большими скоростями ветра имеется некоторое «замирание» («медленные» порывы). При этом коэффициенты порывистости в этих эпизодах различаются не очень значительно. Не приводя дополнительных иллюстраций, отметим также, что k_5 и k_{10} были примерно одинаковы, средняя скорость ветра на высоте 10 м была больше, чем на высоте 5 м, в то же время значения максимальных порывов в первом эпизоде на высоте 10 м меньше, а во втором – больше по сравнению с высотой 5 м (за исключением последнего интервала времени). Это отражено в табл. 3.



а)



б)

Рис. 5. Примеры эпизодов с порывами ветра в пункте наблюдения «БЭК-5» 12.01.2018

Пункт наблюдения «БЭК» 12.01.2018

Интервал времени	Коэффициент порывистости k_5 / k_{10}	Средняя скорость ветра, м/с 5 м / 10 м	Максимальная скорость ветра, м/с 5 м / 10 м
04:00–04:10	2,18 / 2,15	6,7 / 7,1	24,8 / 22,4
04:10–04:20	2,09 / 2,12	5,6 / 6,0	19,5 / 19,3
04:20–04:30	2,13 / 2,13	6,3 / 6,6	22,1 / 20,2
07:40–07:50	2,05 / 2,02	7,0 / 7,5	18,1 / 20,3
07:50–08:00	2,02 / 2,01	6,5 / 6,9	14,9 / 20,2
08:00–08:10	2,08 / 2,04	7,2 / 7,7	22,7 / 21,7

Заключение

Подводя итог, можно сделать следующие выводы. Коэффициенты порывистости, оценка которых составляла основную задачу проделанной работы, слабо зависят от сезона года (использовались измерения за период январь – июль 2018 г.). При этом они существенно зависят от пункта измерений (сравнивались естественный ландшафт и урбанизированная территория). Средний суточный ход коэффициентов порывистости различен в разные сезоны года: в зимнее время он практически отсутствует, а в теплое время года хорошо выражен (днем заметно больше, чем ночью). Это характерно как для урбанизированной территории, так и для естественного ландшафта. Различия между оценками коэффициентов порывистости на высотах 5 и 10 м (естественный ландшафт) невелико. Тем не менее на высоте 5 м порывистость в целом несколько превышает значения на 10 м. Особо отметим, что большое значение коэффициента порывистости еще не означает обязательную реализацию при этом больших значений непосредственно порывов ветра (способных привести к опасным последствиям). В то же время сильные порывы (превышающие, например, 10–15 м/с) могут иметь место и при не очень больших значениях коэффициента порывистости. Считаем необходимым подчеркнуть, что приведенная статистика коэффициентов порывистости может измениться, если ввести предварительное «внутреннее» усреднение «мгновенных» значе-

ний компонентов вектора ветра (например, за период 1 с).

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

Список литературы / References

1. Курбатова М.М., Рубинштейн К.Г. Гибридный метод прогноза порывов ветра // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 07. С. 523–529. DOI: 10.15372/AOO20180704.
2. Курбатова М.М., Рубинштейн К.Г. Hybrid method for wind gust forecast // Optika Atmosfery i Okeana. 2018. V. 31. No. 07. P. 523–529 (in Russian).
3. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеозидат, 1989. 264 с.
4. Byzova N.L., Ivanov V.N., Garger E.K. Turbulence in the boundary layer of the atmosphere. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 264 p. (in Russian).
5. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7. С. 21–25.
6. Gladkikh V.A., Makienko A.E. Digital ultrasonic weather station // Pribory. 2009. No. 7. P. 21–25 (in Russian).
7. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Методические аспекты определения внешних масштабов турбулентности // Успехи современного естествознания. 2018. № 5. С. 64–70. DOI: 10.17513/use.36756.
8. Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L. Methodical aspects of determination of the outer scales of turbulence // Advances in current natural sciences. 2018. № 5. P. 64–70. DOI: 10.17513/use.36756 (in Russian).
9. Born K., Ludvig P., Pinto J.G. Wind gust estimation for Mid-European winter storms: Towards a probabilistic view. Tellus A. 2012. V.64. issue 1. P. 1–17. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17471.
10. Tyner B., Ayyer A., Blaes J., Hawkins D.R. An examination of wind decay, sustained wind speed forecasts, and gust factor for tropical cyclones in the Mid-Atlantic region of the United States. Weather and Forecasting. 2015. V. 30. No. 1. P. 153–176. DOI: 10.1175/WAF-D-13-00125.1.
11. Yu B., Chowdhury A.G. Gust factors and turbulence intensities for tropical cyclone environment. Appl. Meteorol. and Climatology. 2009. V. 48. No. 3. P. 534–552.
12. Mitsuta Y., Tsukamoto O. Studies of spatial structure of wind gust. Applied Meteorology. 1989. V.28. No. 1. P. 1155–1160.