

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.551

Статистика внешних масштабов турбулентности 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 17.01.2019 г.

Представлены результаты вычисления внешних масштабов температурной турбулентности и компонентов вектора ветра в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией и естественным ландшафтом. Рассмотрены среднемесячные значения масштабов, а также их средний суточный ход в различные месяцы. Кратко изложена методика расчета внешних масштабов турбулентности, основанная на результатах параметризации структурных функций исследуемых величин.

Ключевые слова: ветер, внешний масштаб, приземный слой, температура, турбулентность; wind, outer scale, surface layer, temperature, turbulence.

Введение

Решение ряда задач, связанных с распространением в атмосфере оптического излучения, требует корректного учета текущего состояния полей температуры воздуха и вектора ветра. В частности, необходима достоверная оценка характеристик турбулентных составляющих этих полей. Одним из важных параметров, характеризующих структуру турбулентности, является ее внешний масштаб. Изучению данного параметра посвящено большое количество работ, однако исследования в этом направлении остаются актуальными. Например, внешние масштабы турбулентности («локальные» и «интегральные») рассматриваются как фактор, который следует учитывать при астрономических наблюдениях [1–5], в задачах распространения оптического излучения и адаптивной оптики [6–10]. Кроме того, масштабы турбулентности играют важную роль в изучении и моделировании динамических процессов в пограничном слое атмосферы [11–15]. Более подробный обзор публикаций по конкретным проблемам определения величин и методикам учета внешних масштабов турбулентности в прикладных задачах можно найти в указанных выше работах.

Несмотря на имеющиеся в литературе экспериментальные и модельные расчеты величин внешних масштабов турбулентности (ВМТ), мы полагаем, что общая статистика ВМТ для разных мест наблюдения в разные сезоны и время суток может оказаться полезной при планировании и выполнении научных и прикладных исследований. В связи с этим цель

настоящей работы — оценка общей статистики величин ВМТ температуры и компонентов вектора ветра в приземном слое атмосферы в пунктах наблюдения с естественным ландшафтом и над урбанизированной территорией. Конкретные задачи связаны с определением среднемесячных значений ВМТ, их среднего (за месяц) суточного хода и зависимости от высоты в приземном слое.

Исходные данные и методика оценок внешних масштабов турбулентности

Для решения поставленных задач использовались результаты измерения температуры воздуха и трех компонентов вектора ветра в пунктах наблюдения «Томск», «БЭК» и «Фоновая» с помощью ультразвуковых метеостанций (УЗМ) «Метео-2» [16]. Частота измерений составляла 10 Гц.

Первый пункт наблюдения («Томск») соответствует урбанизированной территории. Он расположен на западной окраине г. Томска (Академгородок). УЗМ размещалась на мачте высотой 5 м, расположенной на крыше лабораторного корпуса ИОА СО РАН. Общая высота над уровнем подстилающей поверхности — около 17 м.

Второй пункт наблюдения («БЭК» — Базовый экспериментальный комплекс ИОА СО РАН) можно отнести к естественному ландшафту. Он расположен вне городской зоны и представляет собой большую поляну, окруженную лесопосадками высотой 10–15 м. В данном пункте на одной мачте были размещены две УЗМ на высотах 5 и 10 м. В пунктах «Томск» и «БЭК» измерения велись круглосуточно и круглогодично.

Третий пункт наблюдения («Фоновая» — территория обсерватории ИОА СО РАН) расположен

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

на большой поляне, окруженной с трех сторон лесным массивом (деревья высотой до 15–20 м), а с четвертой стороны – р. Обью. Измерения проводились на высотах 5 и 10 м (УЗМ размещались на одной мачте). Статистика величин ВМТ в пунктах «Томск» и «БЭК» определялась по измерениям с января по декабрь 2018 г., а в пункте «Фоновая» – с июля по октябрь 2018 г.

Прежде чем представить полученные результаты, кратко изложим использованную методику расчета ВМТ. Во-первых, на начальном этапе обработки определяются «мгновенные» значения продольной U и поперечной V составляющих ветра относительно среднего направления ветра на «скользящем» интервале времени Δt . Во-вторых, полученные выборки «мгновенных» значений $U(t)$ и $V(t)$, а также вертикальной составляющей полного вектора ветра $W(t)$ и температуры воздуха $T(t)$ сглаживаются скользящим средним с «временным окном» δ . Обозначим результаты сглаживания $\tilde{U}(t)$, $\tilde{V}(t)$, $\tilde{W}(t)$ и $\tilde{T}(t)$ соответственно. После этого выделяются турбулентные составляющие полей температуры воздуха и компонентов вектора ветра: $T'(t) = T(t) - \tilde{T}(t)$, $u'(t) = U(t) - \tilde{U}(t)$, $v'(t) = V(t) - \tilde{V}(t)$, $w'(t) = W(t) - \tilde{W}(t)$. Именно эти величины (турбулентные пульсации) подвергаются дальнейшему анализу.

Изложенная методика выделения турбулентных пульсаций и сравнение полученных по ней оценок ВМТ с результатами других подходов более подробно представлены в [17–19]. Отметим, что корректному выделению турбулентных составляющих из общего поля вариаций той или иной метеорологической величины как ранее, так и сейчас уделяется большое внимание (см., например, [20–24]).

Обратимся непосредственно к методике определения ВМТ. Введем обозначения масштабов: L_T – ВМТ температуры воздуха; L_U – ВМТ продольной, L_V – поперечной, L_W – вертикальной составляющих вектора ветра. Основой для вычисления ВМТ на интервале времени Δt служит формула [25]:

$$L_X = \left(\frac{2\sigma_X^2}{C_X^2} \right)^{1/\kappa}, \quad (1)$$

где X – температура или компоненты вектора ветра (T' , u' , v' , w'); σ_X^2 – дисперсия величины X . Константа C_X^2 (структурная характеристика) появляется после параметризации структурной функции (СФ) $D_X(\rho) = [X(t) - X(t + \rho/\bar{U})]^2$ (в «инерционном» интервале турбулентности), где ρ (м) – пространственный сдвиг, который связан со сдвигом по времени τ (с) и средней скоростью продольного ветра \bar{U} формулой $\rho = \tau\bar{U}$. Черта над символами обозначает среднее значение данной величины. Подразумевается стационарность и эргодичность случайной выборки X .

Относительно формулы (1) сделаем некоторые пояснения. В работах [26–28] мы показали, во-первых, что СФ $D_X(\rho)$ на заданном интервале времени

Δt далеко не всегда может быть аппроксимирована аналитической функцией. Во-вторых, при успешной аппроксимации аналитическое представление СФ может иметь более сложный вид, чем «простой» степенной закон $D_X(\rho) \sim \rho^\mu$, являющийся основой формулы (1). В обобщенном виде параметризацию СФ можно записать как

$$D_X(\rho) \approx C_X^2 \rho^\mu G(\rho), \quad (2)$$

где безразмерная функция $G(\rho)$ равна единице при $\rho = 1$ м. Область существования СФ в форме (2) ограничивается диапазоном сдвигов $0 < \rho \leq \rho_{\max}$, вне которого формула (2) уже не обеспечивает аппроксимацию эмпирической функции $D_X(\rho)$ с заданной точностью. Поскольку подразумевается стационарность функции $X(t)$, то ее СФ должна «насыщаться» (становиться постоянной) на уровне $2\sigma_X^2$ в области сдвигов $\rho > \rho_{\max}$. Размерность структурной характеристики C_X^2 определяется размерностями множителя ρ^μ и структурной функции $D_X(\rho)$.

С формальной точки зрения следовало бы предположить выполнение равенства

$$D_X(\rho \rightarrow \infty) = 2\sigma_X^2 = C_X^2 L_X^\mu G(L_X)$$

и решить данное уравнение (в общем случае нелинейное) относительно L_X . Однако мы упростили постановку задачи и использовали для вычисления L_X соотношение вида (1) с показателем степени κ . Этот показатель определяется по наклону касательной к обобщенной СФ вида (2) в точке $\rho = 1$ м. При этом числовое значение величины C_X^2 задается равным числовому значению СФ $D_X(\rho)$ при сдвиге $\rho = 1$ м (хотя размерности этих величин не совпадают!). Отметим, что равенство $\kappa = \mu$ возможно только в том случае, когда функция $G(\rho) \equiv 1$ на всем интервале $0 < \rho \leq \rho_{\max}$. Результаты апробирования изложенной методики представлены в [17].

Результаты расчетов

Поскольку величины L_X зависят, в том числе, от способа выделения турбулентных составляющих температуры воздуха и компонентов вектора ветра, то необходимо определиться при обработке исходных данных со значениями интервалов Δt (длительность интервала оценки) и δ (длительность «сглаживающего окна» при вычислениях \tilde{X}). Некоторые результаты анализа влияния Δt и δ на L_X при использовании вышеизложенной методики опубликованы в [19]. По этим результатам был сделан «оптимальной» выбор: $\Delta t = 10$ мин и $\delta = 2$ мин. Тем не менее считаем полезным привести несколько примеров среднемесячных L_X , вычисленных при фиксированном значении $\Delta t = 10$ мин и нескольких значениях δ : 1, 2 и 5 мин. Эти примеры приведены на рис. 1. Представлены результаты обработки экспериментальных данных за ноябрь 2018 г. в пункте наблюдения «БЭК» (на высотах 5 и 10 м). Указаны средние и медианные (за месяц) значения масштабов L_X .

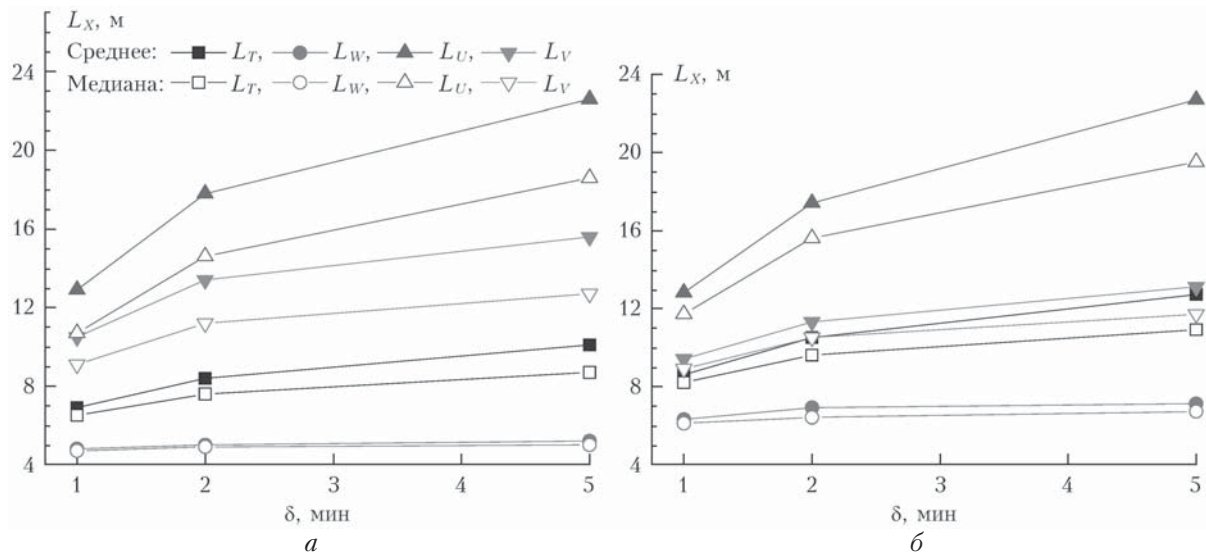


Рис. 1. Зависимость L_X от длительности «сглаживающего окна» δ при $\Delta t = 10$ мин на высотах 5 (а) и 10 м (б) в пункте наблюдения «БЭК» в ноябре

Наименьшее влияние размер «сглаживающего окна» оказывает на L_W , наибольшее — на L_U . Можно предположить, что при использовании $\delta = 5$ мин в отфильтрованной выборке остаются вариации локального (квазидетерминированного) характера, которые заметно увеличивают значения L_U . Все представленные далее результаты получены с использованием $\Delta t = 10$ мин и $\delta = 2$ мин.

Обратим внимание на то, что медианные значения L_X всегда меньше средних. Это говорит об асимметрии распределения ВМТ, особенно для продольной и поперечной составляющих вектора ветра. Асимметрия распределения ВМТ отмечалась и другими исследователями (см., например, [2, 5, 8]). В этой связи было принято решение основной анализ ВМТ проводить по их медианным значениям, что, на наш взгляд, статистически более корректно.

В соответствии с применявшейся методикой расчета ВМТ на предварительном этапе проводилась аппроксимация СФ величины X аналитическим выражением на каждом «элементарном» интервале обработки Δt . В случае, если на этом интервале аппроксимация СФ X с заданной точностью была невозможна, данный интервал исключался из дальнейшего анализа (только по конкретной величине X !). По этой причине статистическая обеспеченность оценок L_X в разных пунктах наблюдения в разные сезоны оказалась различной. Данный факт иллюстрирует таблица, в которой приведена статистика успешности параметризации СФ аналитическими выражениями, а следовательно, и возможности оценок ВМТ по формуле (1). Таблица содержит результаты работы в трех пунктах наблюдения на протяжении 2018 г. Для каждого пункта приведено количество

Статистика успешных параметризаций структурных функций

Пункт	Параметр	Месяц 2018 г.											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
«Томск»	Σ	728	634	699	670	635	640	720	744	708	715	570	479
	T	65	77	75	80	80	85	82	84	82	77	52	70
	U	82	83	80	81	82	84	84	85	83	82	81	83
	V	90	87	94	96	94	95	94	94	95	96	93	90
	W	87	85	92	94	94	93	93	90	92	94	92	88
«БЭК», 10 м	Σ	714	655	682	658	547	668	706	621	691	688	600	377
	T	65	72	82	89	88	88	88	85	85	86	67	73
	U	80	71	83	90	93	85	84	74	81	90	85	70
	V	76	71	85	95	96	95	95	91	93	96	93	86
	W	78	71	84	95	96	93	93	89	92	96	93	83
«БЭК», 5 м	Σ	712	655	729	441	632	669	683	621	720	688	602	382
	T	51	69	79	87	81	85	82	82	80	83	61	55
	U	76	67	82	91	91	85	83	77	83	91	82	70
	V	77	67	82	92	92	89	88	82	87	92	78	70
	W	73	67	82	92	91	86	85	77	84	91	80	69

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
«Фоновая», 10 м	Σ						561	638	646	720	678		
	T						83	85	84	84	88		
	U						75	79	71	79	90		
	V						87	91	88	90	96		
	W						84	89	85	88	93		
«Фоновая», 5 м	Σ						226	647	625	720	678		
	T						82	84	84	83	85		
	U						74	80	75	80	89		
	V						81	83	80	85	92		
	W						75	80	75	82	89		

обработанных часов (помесячно; округленно; строки с обозначением Σ). Для каждого параметра указан процент времени успешной параметризации его структурной функции в текущий месяц.

На основании таблицы можно сделать вывод, что оценка ВМТ по избранной методике (через параметры аппроксимируемых СФ) обеспечена, как правило, в 80 и более процентах времени. Однако в зимние месяцы успешность параметризации несколько снижается, особенно для пункта наблюдения «БЭК». Полагаем, что в целом статистическая обес-

печенность оценок достаточна для формулировки выводов о среднемсячных значениях ВМТ контролировавшихся параметров во всех пунктах наблюдения.

Одна из целей анализа заключалась в оценке значений ВМТ, характерных для конкретного пункта наблюдения в разные сезоны на заданной высоте. Рассматривались медианные (за месяц) значения ВМТ. Эти значения для трех пунктов наблюдения показаны на рис. 2, а–в. Уточним, что представленные результаты получены без разделения

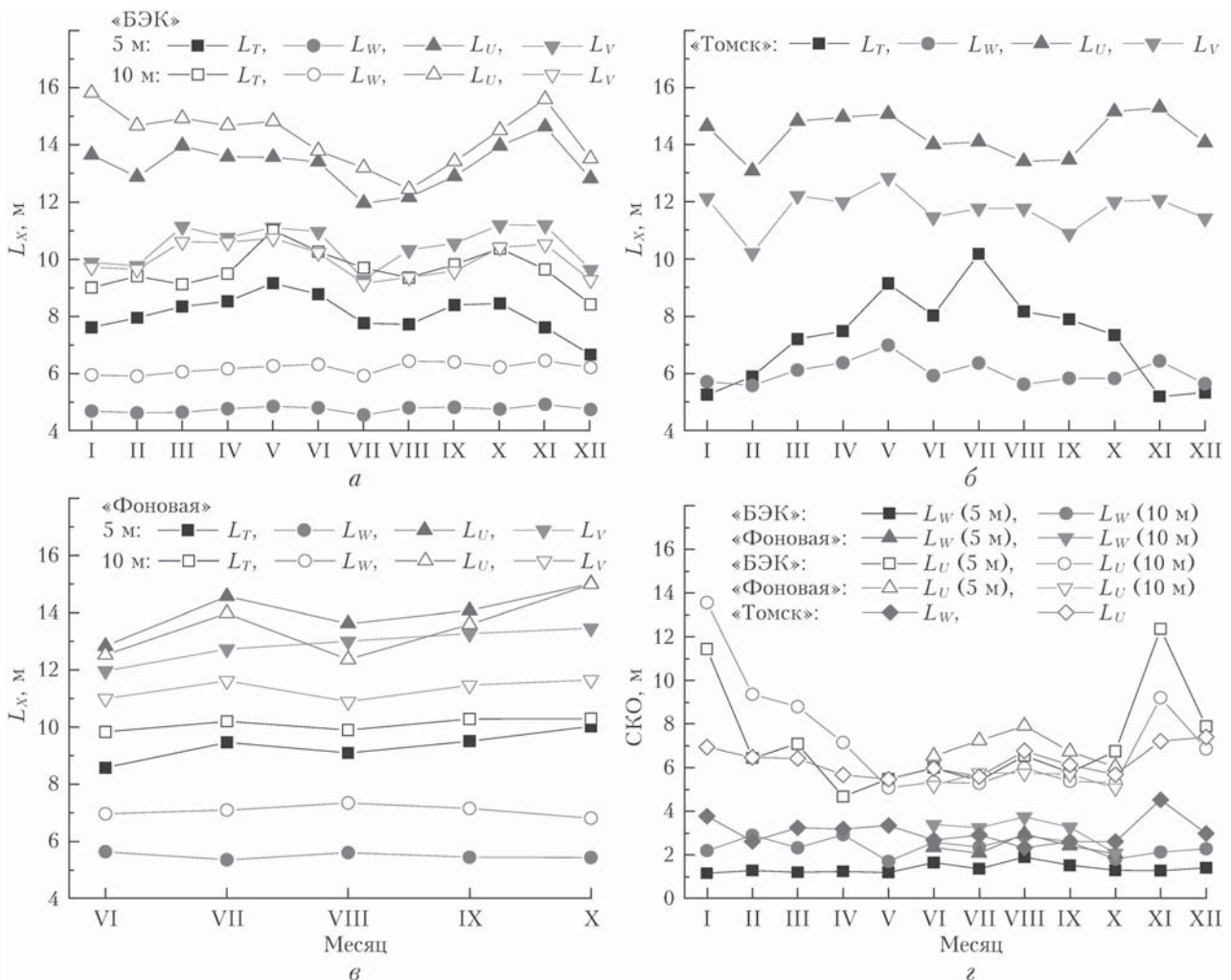


Рис. 2. Медианные значения внешних масштабов турбулентности (а–в) и СКО оценок (з)

на синоптические ситуации, время суток, по скорости и направлению ветра, а также без разделения по другим факторам, которые способны повлиять на формирование поля турбулентности.

Согласно полученным результатам четко выраженного сезонного хода ВМТ нет. Исключение составляет ВМТ температуры в пункте «Томск»: летом он заметно больше, чем зимой. На рис. 2 также продемонстрировано различие ВМТ разных параметров: вертикальный ветер имеет наименьшие значения ВМТ, а продольный — наибольшие. В свою очередь, ВМТ температуры в целом несколько больше ВМТ вертикального ветра, но меньше ВМТ поперечного. Отметим также, что кардинальных различий между ВМТ в разных пунктах наблюдения нет, хотя некоторые особенности (систематические) все же имеются. Это в первую очередь относится к ВМТ температуры и поперечной составляющей вектора ветра.

Разброс «мгновенных» значений ВМТ в течение месяца может быть достаточно большим и характеризуется среднеквадратическими отклонениями (СКО) оценок. На рис. 2, *г* приведены СКО ВМТ вертикального и продольного ветра. Значения СКО ВМТ температуры и поперечного ветра расположены между ними. В теплое время года СКО L_V сравнимо с СКО L_U .

Рассмотрим теперь связь ВМТ с высотой измерения. Некоторое представление о зависимости ВМТ от высоты в приземном слое можно получить на основании рис. 2, *а, в*, где приведены медианные значения ВМТ на уровнях 5 и 10 м. Несмотря на небольшое расстояние между уровнями, отличия ВМТ все же имеются. Более наглядно это иллюстрирует рис. 3 с графиками отношений ВМТ на высоте 10 м к ВМТ (однотипным) на высоте 5 м.

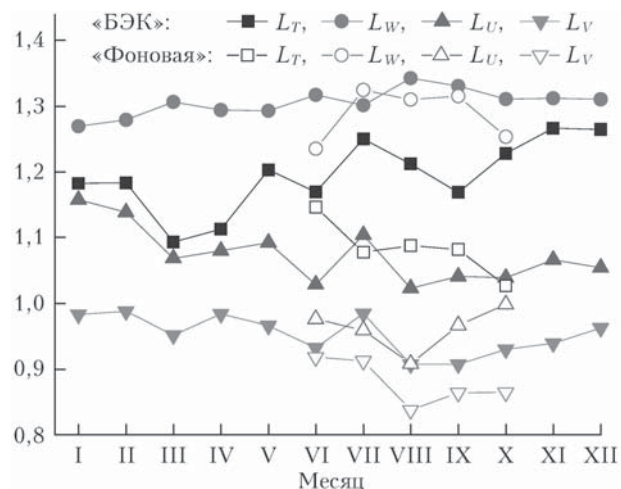


Рис. 3. Отношение медианных значений масштабов на уровне 10 м к однотипным масштабам на уровне 5 м

В пунктах «БЭК» и «Фоновая» масштабы L_T и L_W на высоте 10 м всегда больше, чем на высоте 5 м. В то же время масштаб L_V на высоте 10 м всегда меньше, чем на высоте 5 м. Масштаб L_U в пункте «БЭК» на высоте 10 м несколько больше или почти равен значениям на высоте 5 м, а в пункте «Фоно-

вая» — наоборот. Очевидно, что применение зависимостей ВМТ от высоты измерений, полученных в каком-либо пункте наблюдений, для описания их поведения в других пунктах может привести к ошибкам. Кроме того, использование зависимости от высоты, полученной в каком-либо месяце (сезоне), для других месяцев также может привести к ошибкам.

Подводя промежуточный итог, сравним приведенные выше оценки ВМТ с опубликованными в литературе в первую очередь для температурного поля. В цитируемых выше публикациях указывается, что эти масштабы могут изменяться от единиц до нескольких сотен метров. При этом их средние (или медианные) значения за какой-либо период времени обычно находятся в пределах 5–50 м в зависимости от пункта наблюдения (см., например, [2, 3, 5, 8, 10]).

Не разбирая в деталях те или иные случаи, еще раз отметим, что расчетные величины ВМТ во многом определяются использованной методикой анализа турбулентных составляющих исследуемой величины. Различие в оценках ВМТ при обработке одной и той же выборки разными методами может достигать сотен метров, как это было продемонстрировано в [17, 18]. Иллюстрацией данного вывода может служить рис. 4, на котором представлены интегральные функции распределения масштаба L_T по измерениям в августе 2018 г. в пункте «БЭК» на высоте 10 м. Ось абсцисс содержит разрыв с изменением после него шага шкалы.

Приведенные на рис. 4 графики рассчитаны по формуле (1). График 1 получен в полном соответствии с изложенной методикой оценок ($\kappa = \kappa_{\text{var}}$ переменная величина) при $\Delta t = 10$ мин и $\delta = 2$ мин. График 2 отличается от графика 1 только тем, что рассчитан при постоянном значении $\kappa = 2/3$ («колмогоровская» турбулентность). В свою очередь, график 3 получен по формуле (1) при $\kappa = 2/3$ с использованием «выборочной» дисперсии $\sigma_{Tm}^2 = [T(t) - \bar{T}]^2$, где \bar{T} — выборочное среднее (среднее арифметическое) температуры воздуха за интервал обработки $\Delta t = 10$ мин. Очевидно существенное отличие (значительное увеличение) значений ВМТ L_T в последнем случае по сравнению с результатами, полученными по методике выделения турбулентных пульсаций путем вычитания из исходной выборки скользящего среднего. Как правило (в том числе и в некоторых из процитированных нами статей), для расчета применяется именно такой подход, который приводит к завышенным значениям внешних масштабов турбулентности.

Отметим, что если увеличить размер «сглаживающего окна», применяемого для выделения турбулентных пульсаций, то и значения внешних масштабов несколько увеличатся. Это демонстрирует, в частности, рис. 1. Еще одним примером может служить рис. 4, где представлен график 4 интегральной функции распределения масштаба L_T , полученный по нашей методике (с оценкой параметра $\kappa = \kappa_{\text{var}}$ в каждом обработанном интервале) при $\Delta t = 10$ мин и $\delta = 5$ мин. Наблюдается увеличение

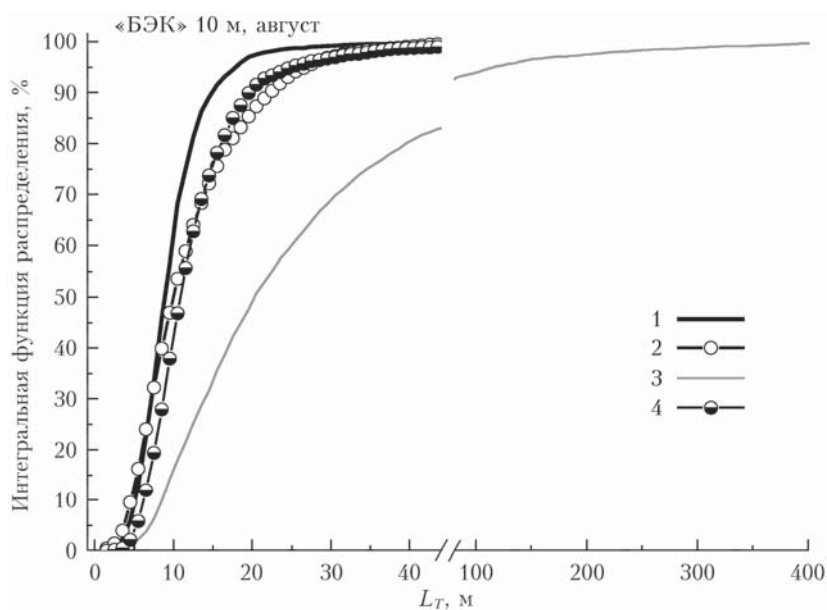


Рис. 4. Интегральные функции распределения внешнего масштаба температурной турбулентности при разных подходах к его вычислению

масштаба (по отношению к случаю $\delta = 2$ мин), но оно не является кардинальным. Следует еще раз подчеркнуть, что расширение «скользящего окна» повышает вероятность присутствия в обрабатываемой выборке вариаций, относящихся уже не к турбулентной, а к «квазидетерминированной» части исследуемого параметра.

Не приводя дополнительных иллюстраций, укажем, что для масштабов L_V и L_U интегральные функции распределения имеют закономерности, приписанные распределению L_T .

Средний суточный ход внешних масштабов турбулентности

Как уже отмечалось, результаты получены без разделения по факторам, влияющим на формирование величин ВМТ. Анализ этих факторов составляет отдельную задачу и здесь не проводится. Однако считаем необходимым в данной публикации представить оценки суточного хода ВМТ.

Поскольку приведенная статистика ВМТ связана со среднемесячными значениями масштабов, то и суточный ход ВМТ рассмотрим как средний за месяц. При этом будем оперировать средними (и медианными) значениями ВМТ, которые имели место в тот или иной часовой интервал текущего месяца (6 значений). Следовательно, за один месяц потенциально могло быть рассчитано 180 или 186 значений ВМТ (в феврале — 168 значений). В декабре 2018 г. обработано лишь 20 дней. Фактический объем (суммарная длительность) выборок во все месяцы 2018 г. был несколько меньше как из-за профилактических и ремонтных работ, так и из-за невозможности параметризации структурных функций исследуемых параметров, являвшихся основой для определения

ВМТ. Тем не менее статистическая обеспеченность оценок, по нашему мнению, оказалась достаточной. Этот вывод иллюстрирует приведенная ранее таблица.

На рис. 5 показан пример среднего суточного хода (ССХ) ВМТ температуры воздуха и продольной составляющей ветра (выборочные средние и медианы) для января и августа 2018 г. в пункте наблюдения «Томск» с указанием СКО («полуотрезки» с привязкой к средним значениям). Приведенные графики в целом отражают ССХ ВМТ в холодный и теплый периоды года всех рассмотренных параметров, а не только ВМТ температуры и продольного ветра. Естественно, для каждого пункта наблюдения имеются свои особенности. Некоторые из них будут рассмотрены далее. Основная задача заключалась не в детальном исследовании особенностей ССХ ВМТ в разные месяцы в разных пунктах наблюдения, а в ответе на обобщенный вопрос: имеется ли в принципе суточный ход величин внешних масштабов турбулентности?

Прежде всего, рассмотрим ССХ ВМТ компонентов вектора ветра. На рис. 6 приведены графики ССХ медианных значений ВМТ в пункте наблюдения «БЭК» на высоте 10 м для всех месяцев 2018 г. Мы не ввели обозначения отдельных месяцев, поскольку основная задача рисунка — продемонстрировать обобщенное поведение ССХ. Не указаны и СКО оценок. Их величины примерно соответствуют СКО, приведенным на рис. 5.

Согласно рис. 6 наиболее хорошо выражен ССХ ВМТ поперечной составляющей вектора ветра во все месяцы, за исключением декабря (возможно, в этом месяце все же сказывается недостаточная статистическая обеспеченность оценок). Наибольшие значения L_V соответствуют дневному времени, отличаясь на несколько метров в другое время суток.

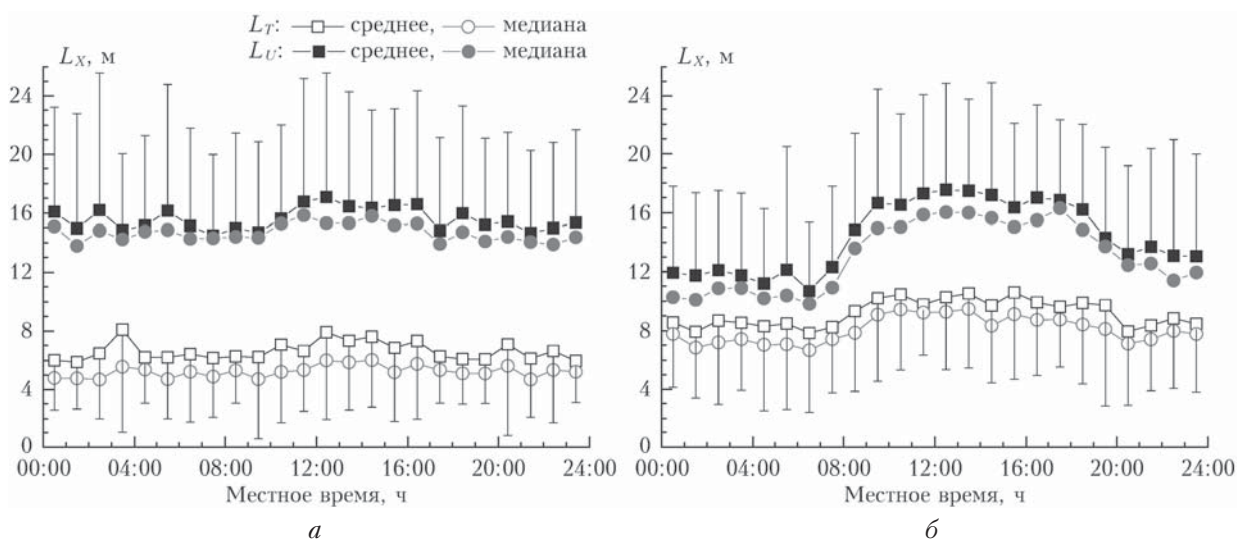


Рис. 5. Средний суточный ход ВМТ температуры воздуха и продольной составляющей ветра (средние и медианные значения) с указанием среднеквадратических отклонений оценок («полуотрезки») для пункта наблюдений «Томск»: январь (а), август (б)

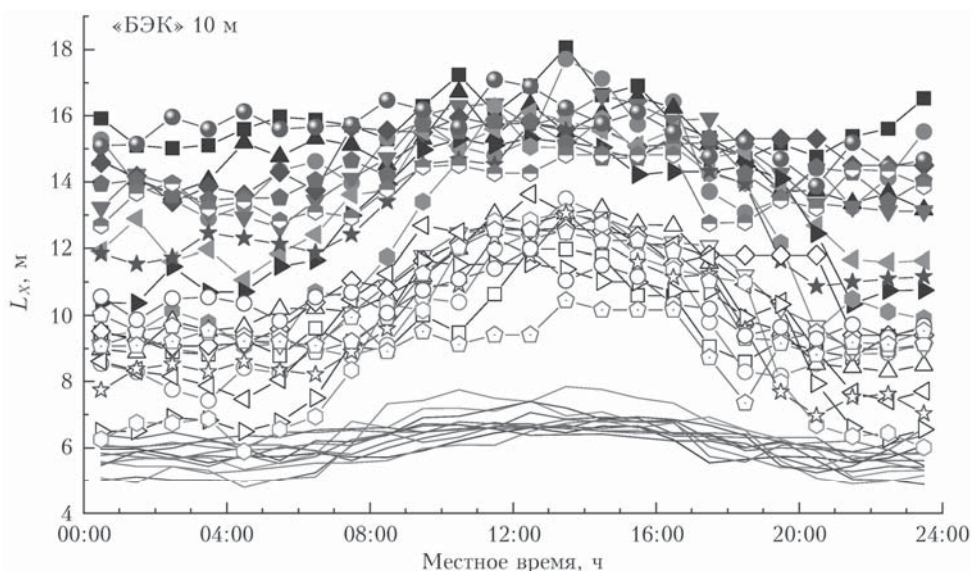


Рис. 6. Средний суточный ход ВМТ компонентов вектора ветра (медианные значения): темные символы – продольный ветер (L_U), светлые символы – поперечный (L_V), линии без символов – вертикальный (L_W)

Несмотря на небольшое изменение в течение суток ВМТ вертикального ветра для данного параметра также просматривается некоторый суточный ход с увеличением значений в дневное время. В свою очередь, ССХ ВМТ продольного ветра существенно зависит от времени года: летом он выражен достаточно хорошо, а зимой – хуже. Это различие аналогично примеру на рис. 5 для пункта «Томск». Не приводя дополнительных иллюстраций, укажем, что общее поведение ССХ ВМТ компонентов вектора ветра в пунктах «Томск» и «БЭК» (5 м) аналогично примеру, приведенному на рис. 6 для пункта «БЭК» (10 м). В пункте «Фоновая» на высотах 5 и 10 м

в летние месяцы поведение ССХ ВМТ компонентов вектора ветра схоже по структуре с теми закономерностями, которые характерны для пункта «БЭК» на этих же высотах.

Отдельно рассмотрим ССХ ВМТ температуры воздуха, поскольку этот параметр достаточно активно используется при решении задач оптики атмосферы. Некоторое представление о его суточном ходе в пункте наблюдения «Томск» можно получить уже на основе рис. 5. Более подробная информация приведена на рис. 7, где отдельно показаны ССХ ВМТ температуры для пунктов «Томск» и «БЭК» во все месяцы 2018 г.

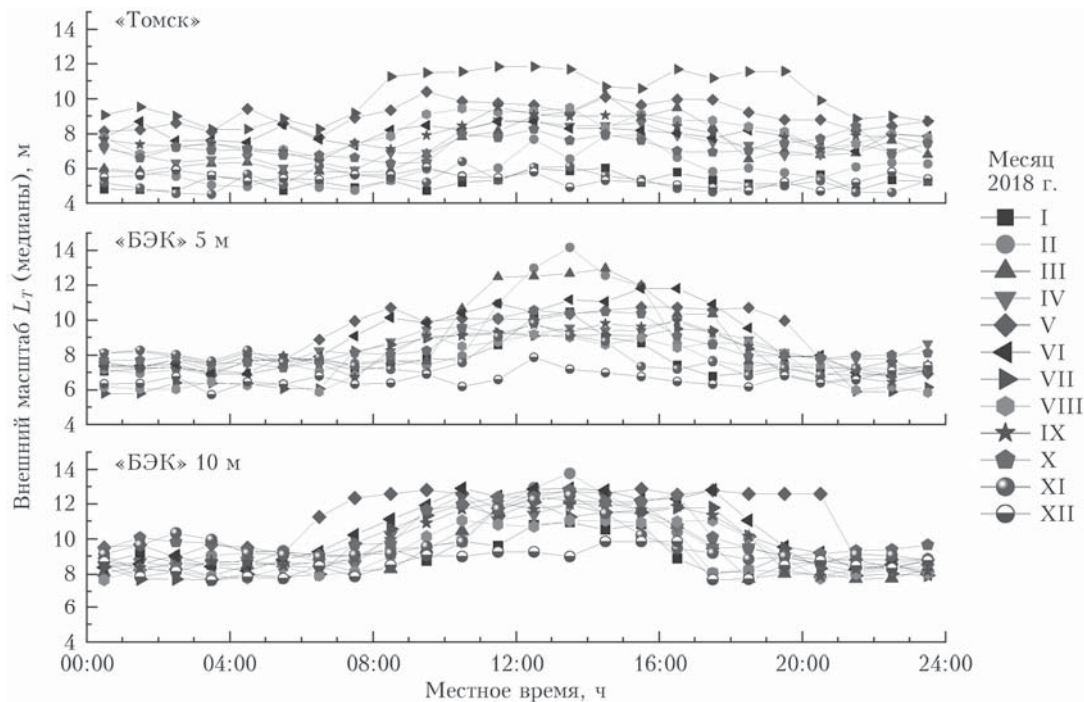


Рис. 7. Средний суточный ход ВМТ L_T в разных пунктах наблюдения

Согласно рис. 7 в ССХ L_T в пункте «БЭК» на обеих высотах наблюдается увеличение значений масштабов в дневное время практически во все месяцы 2018 г. В пункте «Томск» такое поведение характерно только для теплого сезона.

Заключение

Подводя итог, сделаем некоторые обобщающие выводы.

1. Рассчитанные по экспериментальным данным величины внешних масштабов турбулентности температуры воздуха и компонентов вектора ветра в приземном слое атмосферы трех пунктов наблюдения (урбанизированная территория и естественный ландшафт) имеют вполне адекватные значения и в целом соответствуют результатам, опубликованным в литературе.

2. Отсутствует явный сезонный ход среднемесячных значений внешних масштабов в данных пунктах, за исключением масштаба L_T в пункте «Томск».

3. Средние значения внешних масштабов увеличиваются с высотой, за исключением внешнего масштаба поперечной составляющей ветра, который с высотой уменьшается.

Особо отметим наличие среднего суточного хода величин внешних масштабов температурной турбулентности над естественным ландшафтом во все сезоны года и над урбанизированной территорией — только в летнее время.

В процессе обработки экспериментальных данных было установлено, что в отдельных эпизодах параметризовать структурные функции того или иного параметра аналитическими функциями не

представляется возможным. Поэтому невозможно вычислить внешний масштаб турбулентности по выбранной нами методике. Отчасти это связано с достаточно жесткими критериями, которые были установлены при подборе аппроксимирующих функций. Если эти критерии несколько «ослабить», то процент успешности параметризации структурных функций возрастет. Однако имели место и такие случаи, когда параметризация в принципе была невозможна. Вопрос о том, какова была структура турбулентности в этих случаях, требует специального рассмотрения. Отдельный анализ требуется и для оценки влияния на величины масштабов турбулентности «внешних» факторов: типа текущей стратификации, скорости и направления ветра, особенностей ландшафта в пунктах наблюдения и т.п.

Все измерения выполнялись с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Атмосфера» ИОА СО РАН.

1. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В. Влияние подстилающего рельефа на дрожание астрономических изображений // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 361–368.
2. Ziad A., Conan R., Tokovinin A., Martin F., Borgnino J. From the grating scale monitor to the generalized seeing monitor // Appl. Opt. 2000. V. 39, iss. 30. P. 5415–5425.
3. Ziad A., Schock M., Chanan G.A., Troy M., Dekany R., Lane B.F., Borgnino J., Martin F. Comparison of measurements of the outer scale of turbulence by three different techniques // Appl. Opt. 2004. V. 43, N 11. P. 2316–2324.
4. Большасова Л.А., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов В.В., Торзаев А.В. Особенности дрожания изображения оптического источника в случайной среде с конечным внешним масштабом // Оптика атмосф.

- и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 845–851; *Bolbasova L.A., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov V.V., Torgaev A.V.* Features of optical image jitter in a random medium with a finite outer scale // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 2. P. 79–84.
5. *Ziad A.* Review of the outer scale of the atmospheric turbulence // *Proc. SPIE.* 2016. V. 9909. P. 99091K-1-12.
 6. *Dewan E.M., Grossbard N.* The inertial range "outer scale" and optical turbulence // *Environ. Fluid Mech.* 2007. V. 7. P. 383–396.
 7. *Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В.* О влиянии масштабов атмосферной турбулентности // *Усп. совр. естеств.* 2015. № 1, Ч. 7. С. 1179–1183.
 8. *Martini E., Freni A., Cuccoli F., Facheris L.* Derivation of clear-air turbulence parameters from high-resolution radiosonde data // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2017. V. 34, N 2. P. 277–293.
 9. *Алмаев Р.Х., Суворов А.А.* О насыщении флуктуаций интенсивности излучения в слабопоглощающей турбулентной атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2008. Т. 44, № 3. С. 360–370.
 10. *Guesalaga A., Neichel B., Correia C.M., Butterley T., Osborn J., Masciadri E., Fusco T., Sawage J.-F.* On-line estimation of the wavefront outer-scale profile from adaptive optics telemetry // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. V. 465, N 2. P. 1984–1994.
 11. *Brugger P., Traummer K., Jung C.* Evaluation of a procedure to correct spatial averaging in turbulence statistics from Doppler lidar by comparing time series with ultrasonic anemometer // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2016. V. 33, N 10. P. 2135–2144.
 12. *Klip C.* Turbulence anisotropy in the near-surface atmosphere and the evaluation of multiple outer length scales // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2014. V. 151, N 1. P. 57–77.
 13. *Salesky S.T., Chamecki M., Katul G.G.* Bouyancy effects on the integral lengthscales and mean velocity profile in atmospheric surface layer flows // *Phys. Fluids.* V. 25, N 10. P. 105101.
 14. *Liu H., Yuan R., Mei J., Sun J., Liu Q., Wang Y.* Scale properties of anisotropic and isotropic turbulence in the urban surface layer // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2017. V. 165, N 2. P. 277–294.
 15. *Simiu E., Potra F.A., Nandi T.N.* Determining longitudinal integral turbulence scale in the near-neutral atmospheric surface layer // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/s10546-018-0400-4> (last access: 17.12.2019).
 16. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы.* 2009. № 7. С. 21–25.
 17. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Методические аспекты определения внешних масштабов турбулентности // *Усп. совр. естеств.* 2018. № 5. С. 64–70.
 18. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Сравнение методик измерения внешних масштабов турбулентности на основе результатов измерений ультразвуковыми анемометрами–термометрами // *XXIV Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»:* материалы симпозиума [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2018. С. D279–D282.
 19. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Выбор временных интервалов при определении внешних масштабов турбулентности // *XXIV Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»:* материалы симпозиума [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2018. С. D275–D278.
 20. *Ламли Дж., Пановский Г.А.* Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
 21. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей /* под ред. Ф.Т.М. Ньистадта, Х. ван Допа. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 352 с.
 22. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 264 с.
 23. *Курбацкий А.Ф.* Введение в моделирование турбулентного переноса импульса и скаляра. Новосибирск: ГЕО, 2007. 331 с.
 24. *Donateo A., Cava D., Contini D.* A case study of performance of different detrending methods in turbulent-flux estimation // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2017. V. 164, N 1. P. 19–37.
 25. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
 26. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть I. Типичные формы структурных функций // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 11. С. 948–954; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Structure functions of air temperature over an inhomogeneous underlying surface. Part I. Typical forms of structure functions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 27, N 2. P. 147–153.
 27. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть II. Статистика параметров структурных функций // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 11. С. 955–963; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Structure functions of air temperature over an inhomogeneous underlying surface. Part II. Statistics of structure functions' parameters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 27, N 2. P. 154–163.
 28. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Структурные функции компонента вектора ветра над неоднородной подстилающей поверхностью // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 10. С. 882–890; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Structure functions of wind velocity components over an inhomogeneous underlying surface // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 273–281.

V.A. Gladkikh, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. Statistics of outer turbulence scales in the surface air layer.

The outer scales of temperature turbulence and wind vector components in the surface air layer over an urban territory and a natural landscape are calculated. Monthly average values of the outer scales and their daily mean dynamics in different months are considered. A technique for calculation of the outer turbulence scale based on the results of parameterization of the structure functions of parameters under study is briefly described.