

# Исследование параметров пограничного слоя атмосферы в городских условиях с помощью средств локальной и дистанционной диагностики.

## Часть 1. Межуровневые корреляции скорости ветра

В.А. Гладких<sup>1</sup>, А.Э. Макиенко<sup>1</sup>, Е.А. Миллер<sup>2</sup>, С.Л. Одинцов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Центральная аэрологическая обсерватория  
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 17.04.2008 г.

Рассмотрены результаты комплексных измерений метеорологических параметров на двух постах наблюдений в г. Москве с помощью содара «Волна-4», ультразвуковой метеостанции «Метео-2» и метеорологического температурного профилера МТП-5. Проведен анализ коэффициентов межуровневой корреляции скорости ветра после осреднения исходных данных по 10-минутным интервалам времени. Выявлен минимум корреляции, отвечающий высоте городского подслоя шероховатости. Обсуждается возможность определения высоты приземного слоя атмосферы над урбанизированной территорией по оценкам коэффициентов корреляции. Отмечается, что усиление скорости ветра приводит к повышению межуровневой корреляции внутри городского подслоя шероховатости, а также выше приземного слоя атмосферы, но в инерционном подслое величина корреляции меняется слабо.

*Ключевые слова:* пограничный слой атмосферы, акустическая диагностика, скорость ветра, коэффициент корреляции; atmospheric boundary layer, acoustic diagnostics, wind speed, correlation coefficient.

### Введение

Особенности распространения оптического излучения в пограничном слое атмосферы (ПСА) во многом определяются влиянием термической структуры, газовым и аэрозольным составом воздуха, процессами перераспределения этих характеристик в ПСА под влиянием сил плавучести и поля скорости ветра. Исследования ПСА средствами локальной и дистанционной диагностики (оптической и акустической в том числе) позволяют установить основные закономерности процессов переноса оптически активных компонентов атмосферы над различными типами подстилающей поверхности. Важным направлением этих исследований является изучение структуры ПСА над городскими районами. Последние годы активно, особенно за рубежом, решается проблема адекватного описания влияния урбанизированной территории на структуру ПСА. Исследования ведутся как на теоретическом уровне с итоговой разработкой моделей, учитывающих особенности влияния городской застройки на средние значения и турбулентные характеристики полей температуры и вектора ветра

[1–8], так и на экспериментальном уровне, включающем лабораторные эксперименты [9, 10] и натурные измерения параметров ПСА [11–18]. Проведено несколько крупных комплексных экспериментов, направленных на исследование структуры ПСА над городом [19, 20].

Отметим, что многие города (особенно мегаполисы) имеют развитую сеть приземных измерителей метеорологических параметров, аэрозоля и ряда загрязняющих атмосферу газов. В то же время структура атмосферного слоя выше городской застройки *в мониторинговом режиме* практически не контролируется. Одним из немногих исключений является Москва, где на протяжении достаточно длительного периода в нескольких пунктах внутри городской черты ведутся регулярные наблюдения за состоянием ПСА средствами дистанционной и локальной диагностики. В качестве дистанционных средств измерений используются метеорологические температурные профилемеры и метеорологические акустические локаторы (содары), обеспечивающие измерение параметров атмосферы начиная с высоты в несколько десятков метров и до высоты в несколько сотен метров. Результаты анализа экспериментальных данных дистанционного зондирования атмосферы над Москвой опубликованы в серии статей (см., например, [21–26]). Они являются хорошей основой для проверки адекватности современной теории эволюции ПСА над урбанизированной территорией.

\* Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Андрей Эдуардович Макиенко (andy@iao.ru); Евгений Алланович Миллер (tissary@rambler.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

В то же время на экспериментальном уровне остается недостаточно изученным вопрос о взаимосвязи нижнего (приземного) слоя атмосферы со структурой более высоких слоев над урбанизированной территорией. Эта взаимосвязь является важным фактором, определяющим, в частности, процессы вертикального перераспределения загрязняющих примесей над этой территорией. Например, в [19] отмечается необходимость проведения длительных наблюдений теплового баланса в приземном слое городской атмосферы, а также высоты слоя перемешивания над урбанизированной поверхностью. К этим задачам следует добавить и необходимость наблюдения за профилями температуры и компонентов вектора ветра над городом. Степень согласованности изменений этих параметров на разных высотах в конкретных городских условиях является одной из целей наших исследований.

Понятно, что результаты анализа измерений в какой-либо конкретной точке города невозможно использовать для точного описания процессов и полей на всей городской территории. Это же следует предположить и для выявленных в конкретных пунктах наблюдений взаимосвязей между структурами приземных и вышележащих слоев. Тем не менее вероятные тенденции для некоторых типичных условий (однотипных элементов урбанизированной территории) могут быть установлены. На этом же основании полезным является совместное использование локальных и дистанционных средств диагностики атмосферы в каком-либо конкретном пункте наблюдений с последующим обобщением накопленного экспериментального материала.

В связи с этим на первом этапе работы необходимо было оценить:

1) величину и суточный ход средних значений и турбулентных характеристик основных метеорологических параметров в приземном слое;

2) связь изменений средней скорости ветра (10-минутное осреднение; мезо- $\gamma$ -масштаб) на каком-либо уровне со скоростями ветра ниже и выше этого уровня;

3) величину и суточный ход вертикального турбулентного потока тепла  $Q_s$  и вторых моментов температуры и вертикальной составляющей скорости ветра вблизи подстилающей поверхности (на уровне 5 м), а также их возможную связь со скоростью ветра на вышележащих уровнях.

Естественно, что в рамках одной статьи невозможно детально изложить весь объем полученного и обработанного экспериментального материала по перечисленным задачам. Мы лишь в общих чертах представляем полученные результаты, предполагая в дальнейшем изучить и изложить их более подробно. Первая часть статьи посвящена некоторым результатам исследования корреляционных связей скорости ветра на разных уровнях. Вторая часть статьи, опубликованная в этом же номере, содержит результаты исследования температурного поля ПСА, а также корреляций приземных значений вторых моментов (потока тепла, дисперсий температуры и вертикального ветра) и скоростей ветра на разных высотах.

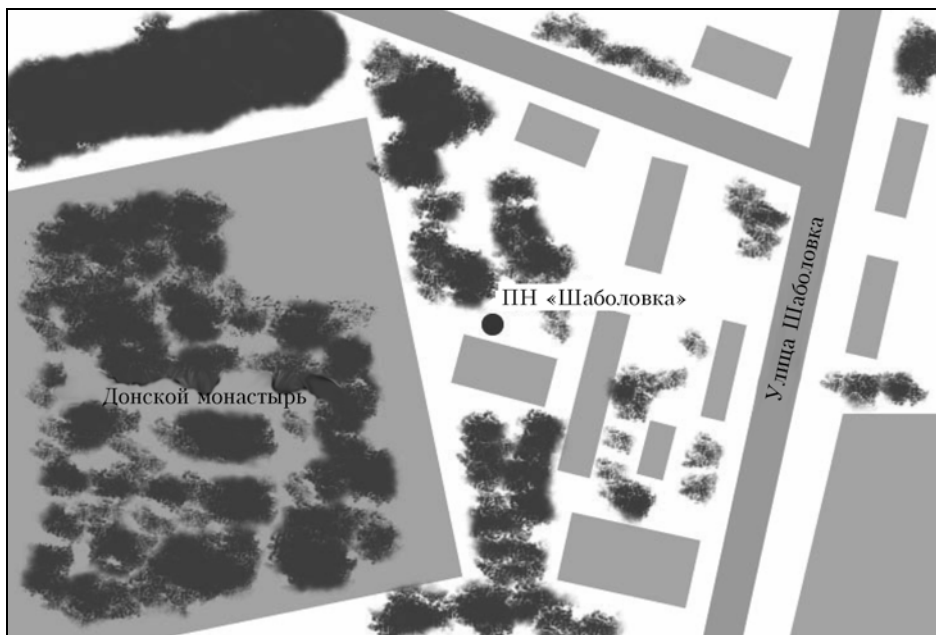
В последующем мы планируем провести совместный анализ концентрации измерявшихся на посту наблюдений «Шаболовка» газов и характеристик ПСА (потоков ветра и тепла).

Прежде чем приступить к изложению полученных результатов, зададим возможную структуру нижнего (приземного) слоя атмосферы над урбанизированной территорией. Воспользуемся моделью, представленной в [17] (подобная модель используется и в [9, 15, 20]). Масштабом в ней является средняя высота сооружений  $H_b$ , окружающих пункт наблюдений. Согласно [17] можно выделить следующие диапазоны городской атмосферы: «неорганизованный покров» (Disorganized Canopy Layer – DCL) с высотой  $z \ll H_b$ ; «городской покров» (Urban Canopy Layer – UCL) с высотой  $z \approx H_b$ ; городской подслои шероховатости (Urban Roughness Sublayer – URS) с высотой  $z$  менее  $(2 \div 5)H_b$ ; инерционный подслой (Inertial Sublayer – IS), примыкающий к верхней границе приземного слоя атмосферы (Atmospheric Surface Layer – ASL). Авторы [17] дают оценку высоты ASL примерно 100 м. Внутри ASL (особенно в подслое URS) на регулярный (мезомасштабный) поток ветра накладываются возмущения, генерируемые слоем UCL. Это приводит к повышенной степени стохастичности потока, зависящей от удаленности от уровня  $H_b$ . Выше уровня ASL поток ветра должен обладать связью между различными уровнями, близкой к детерминированной (по крайней мере, для вариаций потока мезо- $\gamma$ -масштаба и крупнее).

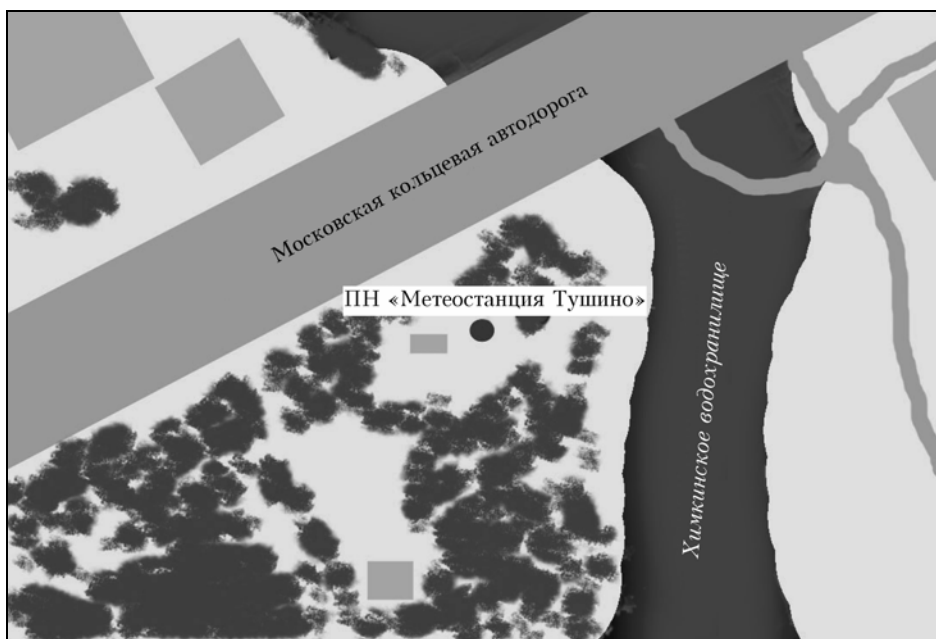
## Место и технические средства проведения измерений

В статье обсуждаются результаты нескольких эпизодов наблюдений метеорологических параметров в двух пунктах Москвы: а) в условиях озелененной городской застройки (пост «Шаболовка» в центре Москвы; измерения велись в период с 30 мая по 6 июля 2006 г.), б) в условиях лесопарковой зоны вблизи береговой линии Химкинского водохранилища (северо-западная часть Москвы, пост «Метеостанция Тушино»; измерения ведутся с 2006 г.). На рис. 1 схематично представлены районы, где находятся данные посты наблюдений.

На этих постах производились измерения: 1) компонентов вектора ветра, температуры, давления и влажности воздуха с помощью ультразвуковой метеостанции (УЗМ) «Метео-2» на высоте 5 м от подстилающей поверхности (периодичность получения данных примерно 10 отсчетов за 1 с); 2) профилей ветра в слое 50–500 м с помощью содара «Волна-4» (периодичность получения одного «мгновенного» профиля около 9 с; шаг по высоте 10 м); 3) профилей температуры прибором МТП-5 (только на посту «Тушино») в диапазоне высот 5–600 м (периодичность получения одного профиля 5 мин, шаг по высоте 50 м). На посту «Шаболовка» наряду с измерениями метеорологических параметров также контролировались (в слое UCL): угарный газ CO, углеводороды (без метана) и оксиды азота NO, NO<sub>2</sub>.



а



б

Рис. 1. Пункты наблюдения: а – ПН «Шаболовка», б – ПН «Метеостанция Тушино» (север вверху)

Использовались серийные газоанализаторы К-100, ГАММА-ЕТ и ЕТ-909. Все перечисленные выше приборы находятся в измерительной сети, созданной ГУП «Мосэкомониторинг» на территории Москвы.

Методические аспекты дистанционной акустической диагностики компонентов вектора ветра в ПСА содаром типа «Волна» достаточно подробно изложены в статьях В.А. Федорова [28–32]. Некоторые методики и результаты обработки экспериментальных данных акустического зондирования ПСА содаром «Волна» приведены в [33–35]. Характеристики УЗМ «Метео-2», а также методики и результаты определения с ее помощью параметров турбулентности

приведены в [27, 36, 37]. Характеристики и некоторые результаты работы метеорологического температурного профилера МТП-5 в Москве и в г. Долгопрудный опубликованы в [25, 26].

## Результаты анализа скорости ветра

### Пост наблюдения «Шаболовка» (ПН «Шаболовка»)

Данный пост окружен 4–5-этажными жилыми и офисными зданиями ( $H_b \approx 20$  м), стеной Донского монастыря, а также внутрирайонными лесопосадками

высотой до 10–15 м. Такая структура микрорайона существенно сказывалась на характеристиках средней (за 10 мин) продольной скорости ветра  $\bar{u}_5$  вблизи поверхности (на высоте 5 м). За период наблюдений в июне 2006 г. она редко превышала 1 м/с («мгновенные» значения на этом уровне в период измерений достигали иногда 5–6 м/с). В то же время  $\bar{u}_{100}$  на высоте 100 м (условный уровень ASL) изменялась в широких пределах. Для примера на рис. 2 представлены результаты измерений  $\bar{u}_5$  и  $\bar{u}_{100}$  с 20 по 24 июня 2006 г.

Этот период характеризовался устойчивой метеорологической ситуацией. Согласно рис. 2 ветер на высоте 5 м существенно слабее ветра на высоте 100 м. Тем не менее изменение  $\bar{u}_5$  в целом согласуется с изменениями  $\bar{u}_{100}$ . Отличие в поведении направления ветра на двух сравниваемых высотах связано с особенностями поля ветра в городских каньонах, которые формируют при небольших скоростях ветра средние потоки с направлениями, существенно отличающимися от направления «внешнего» ветра. При этом согласно рис. 2, б чем больше скорость «внешнего» ветра, тем ближе по значениям направления ветра вблизи подстилающей поверхности и на

высоте 100 м. Как по скорости, так и по направлению ветра на высоте 5 м прослеживается суточный ход. На рис. 2, в, г представлены изменения направления ветра на высотах 5 и 100 м в течение суток. Очевидно, что на высоте 100 м изменения направления ветра были невелики. В то же время на высоте 5 м суточный ход направления ветра сформирован достаточно четко.

Количественно связь скорости ветра на разных высотах оценивалась с помощью коэффициента линейной корреляции (КЛК)  $K_y^x$ , определявшегося как значение нормированной взаимной корреляционной функции  $B_y^x(\tau)$  дискретных по времени нецентрированных выборок  $X(t_i)$  и  $Y(t_i)$  при нулевом значении аргумента  $\tau$  (нулевом значении временного сдвига):

$$K_y^x = B_y^x(\tau = 0) = \frac{1}{N\sqrt{B_x(0)B_y(0)}} \sum_{i=1}^N X(t_i)Y(t_i + \tau).$$

Здесь  $B_x$  и  $B_y$  – автокорреляционные функции выборок  $X(t_i)$  и  $Y(t_i)$  соответственно;  $-1 \leq K_y^x \leq 1$ . Следует отметить, что для  $\tau = 0$  значение КЛК не изменяется при любом порядке суммирования (при произвольной перестановке слагаемых ряда), что позволяет,

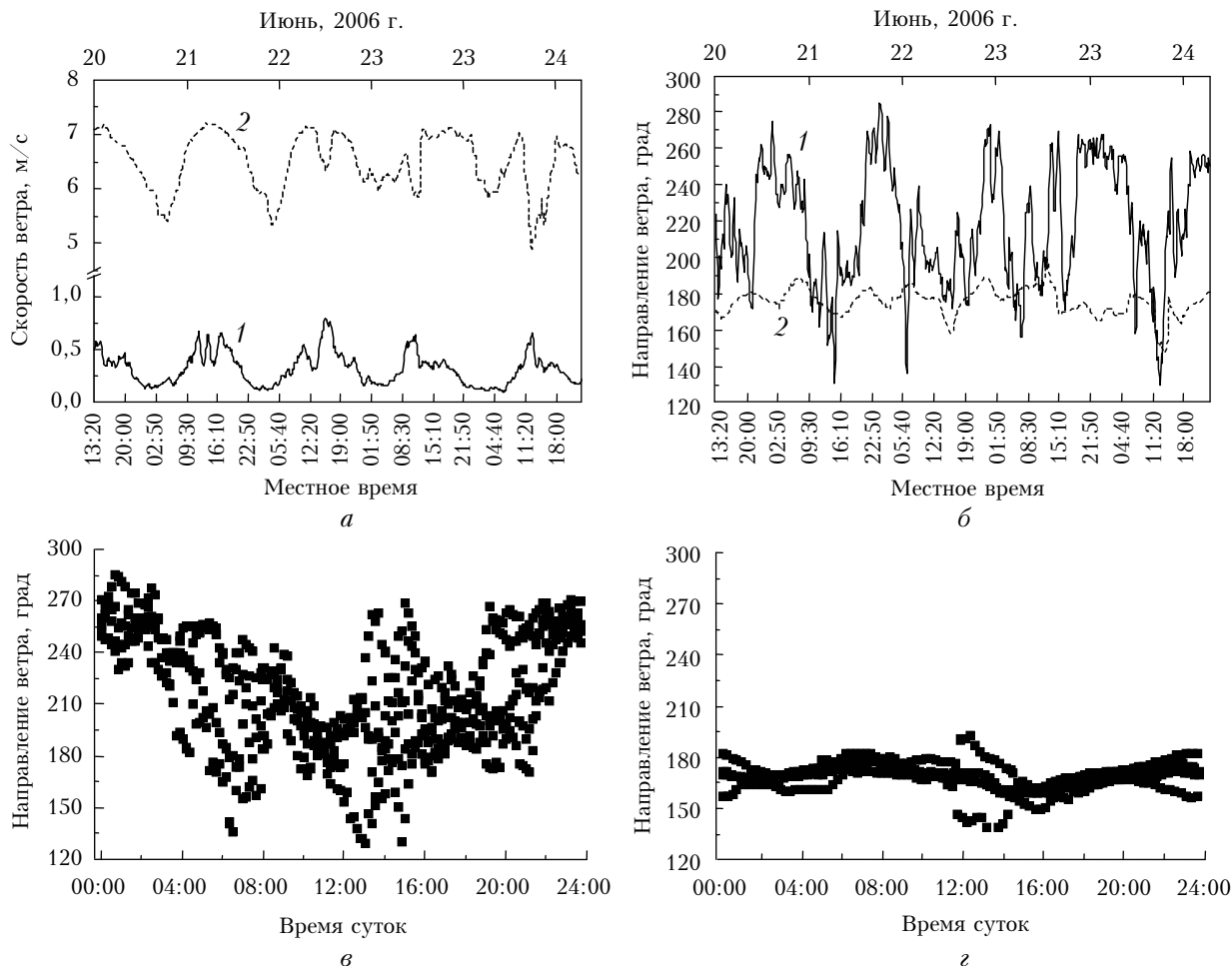


Рис. 2. Пост «Шаболовка». Цикл измерений 20–24 июня 2006 г. Средние за 10 мин значения скорости (а) и направления (б) ветра на высотах 5 (кривая 1) и 100 м (2). Суточный ход направления ветра на высотах 5 м (в) и 100 м (г)

в частности, использовать для расчетов КЛК предварительно отсортированные по какому-либо признаку ряды наблюдений. Важно только, чтобы при сортировке сохранялись произведения  $X(t_i)Y(t_i)$ .

Далее под функциями  $X(t_i)$  и  $Y(t_i)$  понимаются осредненные за 10-минутный интервал времени скорости продольного ветра на разных высотах. Такое осреднение исключает из анализа турбулентный диапазон вариаций скорости ветра. По этой причине оцениваемые КЛК относятся к изменениям скорости ветра достаточно больших масштабов (мезо- $\gamma$ -масштаб и крупнее). В процессе вычислений фиксировалась некоторая опорная высота  $H_0$ . Задавались значения скорости ветра на других высотах  $X(t_i) = \bar{u}(H_0, t_i)$  и  $Y(t_i)$ . По отношению к скорости ветра на высоте  $H_0$  вычислялись КЛК скорости ветра на других высотах (например, для  $H_0 = 100$  м обозначение КЛК —  $K_u^{100}$ ). Представленные ниже результаты получены в диапазоне высот до 200–210 м без разделения состояния ПСА по каким-либо условиям (по типу стратификации, по времени суток, по направлению и скорости общего потока ветра и т.п.).

На рис. 3 приведен  $K_u^{100}$ , полученный за период с 30 мая по 2 июня 2006 г. (ПН «Шаболовка»).

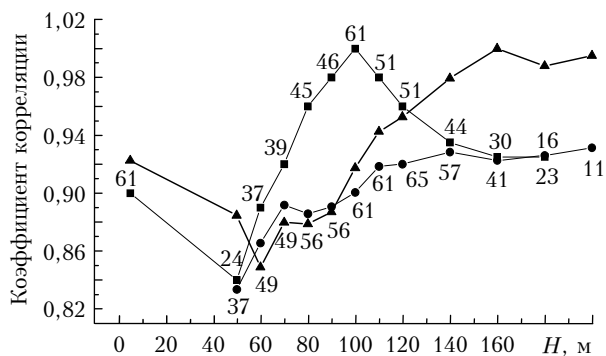


Рис. 3. Коэффициенты линейной корреляции скорости ветра на опорных высотах 5 (точки), 100 (квадраты) и 160 м (треугольники) со скоростями ветра на других высотах для ПН «Шаболовка». Для высот 5 и 100 м указаны суммарные длительности выборок (в часах), по которым оценивались КЛК

Видно, что коэффициенты корреляции достаточно высокие. При этом наблюдаются два экстремума — локальный минимум на высоте 50 м и локальный максимум на опорном уровне 100 м. Наличие акцентированного максимума  $K_u^{100}$  на высоте 100 м свидетельствует о том, что данная высота еще находится внутри ASL и не является его верхней границей. Тенденция к постоянству  $K_u^{100}$  выше уровня 150 м может служить косвенным признаком того, что данный уровень определяет верхнюю границу ASL для ПН «Шаболовка». Для сравнения треугольниками показаны КЛК, полученные при опорной высоте 160 м. Данный график подтверждает, что корреляция начинает систематически уменьшаться при уменьшении высоты, начиная примерно со 150 м. Высота, на которой проявляются локальные минимумы  $K_u^{100}$  и  $K_u^{160}$ , составляет  $(2,5-3,0) \cdot H_b$ , что со-

гласуется с оценками верхней границы URS по [17].

Таким образом, зная ветер на высотах, превышающих границу ASL, и обладая информацией о межуровневой корреляции скорости ветра, можно оценить вероятную структуру потока ветра на нижележащих уровнях над урбанизированной территорией. Можно сформулировать и иную задачу: оценить корреляционные связи скорости ветра вблизи подстилающей поверхности (внутри UCL) со скоростями ветра на вышележащих уровнях. Такая задача была решена для опорной высоты 5 м (измерения с помощью УЗМ) путем расчета  $K_u^5$ .

Результаты расчетов  $K_u^5$  показывают, что корреляция хоть и понижается по сравнению с  $K_u^{100}$ , но остается достаточно высокой. На рис. 3  $K_u^5$  получен по тому же массиву экспериментальных данных, что и  $K_u^{100}$ . Характерно, что относительное постоянство  $K_u^5$  при увеличении высоты наступает на уровне примерно 140 м, который достаточно близок к оценке уровня ASL (150 м), полученной при опорной высоте 100 м.

### Пост наблюдения «Метеостанция Тушино» (ПН «Тушино»)

ПН «Тушино» расположен в лесопарковой зоне, имеющей заметный уклон от Московской кольцевой автодороги в сторону Химкинского водохранилища. Высота деревьев до 10–15 м. Отсутствуют высокие строения в радиусе примерно 500 м от точки наблюдения. Оценочно средняя высота препятствий с учетом уклона  $H_b$  составляет  $20 \div 25$  м. Измерения ветра на ПН «Тушино» показывают примерно те же закономерности, что и на ПН «Шаболовка». При этом средняя скорость ветра в ПН «Тушино» на высоте 5 м достигала несколько больших значений. Здесь также имеется суточный ход скорости и направления ветра в приземном слое. Однако его формирование определяется не городским каньоном, а влиянием близлежащего водоема достаточно большой площади (Химкинское водохранилище). Характерный пример приведен на рис. 4, а, б, где представлены скорость и направление ветра на высотах 5 и 100 м, полученные 24–30 сентября 2007 г.

Этот период характеризовался сначала относительно плавной перестройкой направления «внешнего» потока ветра (24–27 сентября), а затем серией его достаточно сильных хаотических изменений (28–30 сентября). Систематизация направлений приземного ветра на суточном интервале за относительно «спокойный» период 25–28 сентября 2007 г. (рис. 4, в) демонстрирует его отчетливую перестройку в зависимости от времени суток: в утренние и дневные часы приземный ветер направлен преимущественно от водоема на берег, а в вечерние и ночные часы — вдоль берега (см. рис. 1, б). На высоте 100 м такая перестройка уже не наблюдается (рис. 4, г).

Рассчитанные для эпизодов 24–30 сентября и 11–14 ноября 2007 г. КЛК скоростей ветра, так же как и на ПН «Шаболовка», имеют достаточно высокие значения (экспериментальные данные этих эпизодов

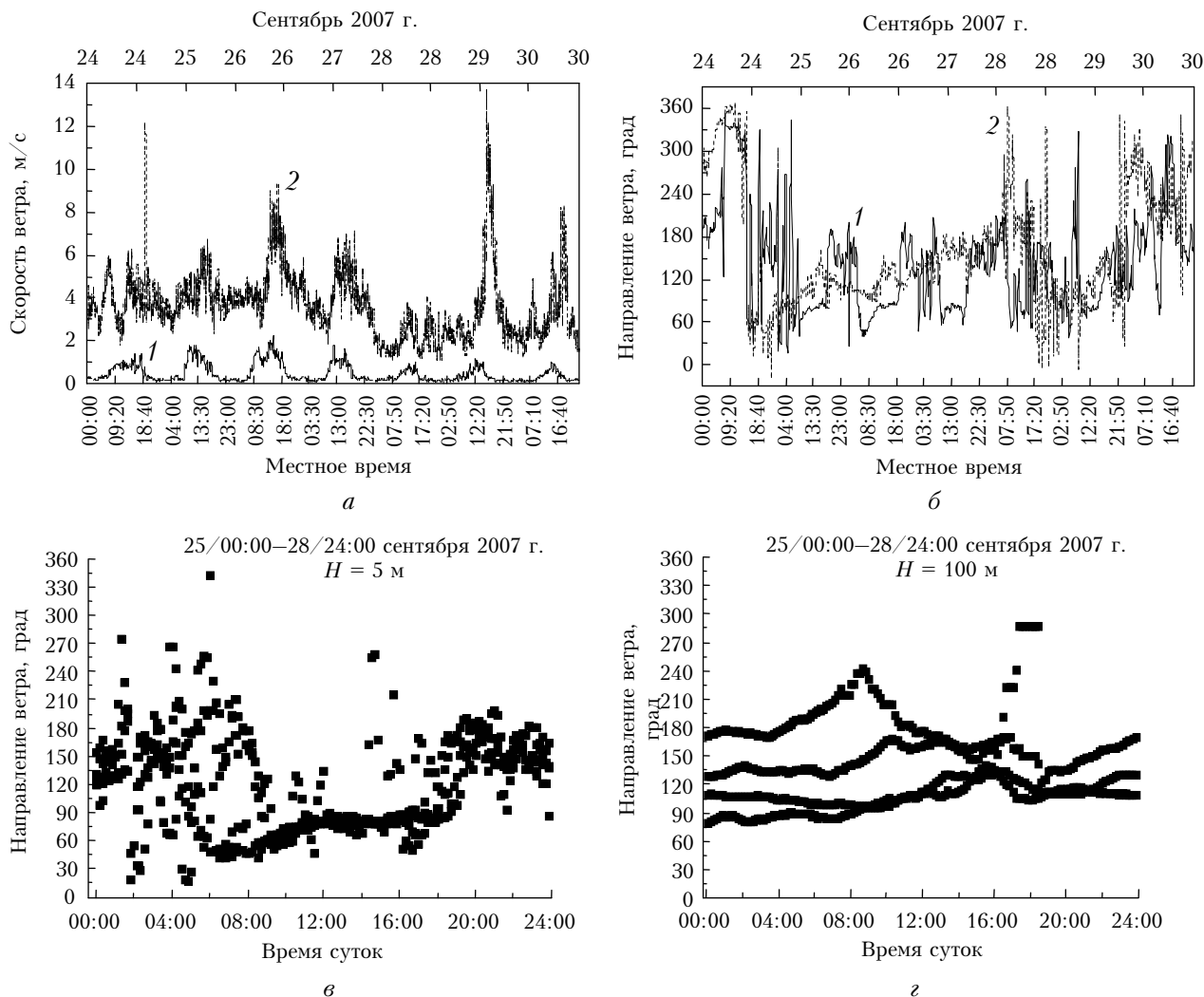


Рис. 4. Пост наблюдения «Тушино». Цикл измерений 24–30 сентября 2007 г. Средние значения скорости (а) и направления (б) ветра на высотах 5 (кривая 1) и 100 м (2). Суточный ход направления ветра на высотах 5 (в) и 100 м (з)

были объединены при оценках  $K_u^l$  с учетом отмеченного ранее свойства  $B_y^x(\tau)$  при  $\tau = 0$ . При этом корреляция между скоростями ветра на опорной высоте 5 м и на вышележащих высотах заметно меньше, чем это наблюдалось на ПН «Шаболовка», что связано, по-видимому, с особенностями «бризового циркуляци» поля ветра в нижней части ПСА. С другой стороны, для опорной высоты 100 м практически отсутствует уменьшение корреляции с вышележащим потоком ветра, как это наблюдается для ПН «Шаболовка». В качестве примера на рис. 5 приведены значения  $K_u^5$ ,  $K_u^{100}$  и  $K_u^{150}$ .

Для опорных высот 5 и 100 м указана статистическая обеспеченность при расчетах КЛК в различных парах высот (суммарная длительность выборок в часах). Основываясь на высотной зависимости КЛК, можно сделать вывод, что для ПН «Тушино» высота приземного слоя атмосферы (граница ASL) составляет примерно 100–110 м. Это несколько меньше, чем на ПН «Шаболовка» (150 м), но совпадает с оценками [17]. Положение локального мини-

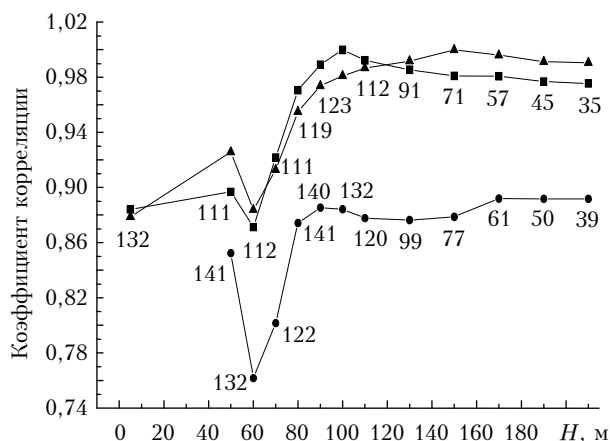


Рис. 5. Коэффициенты линейной корреляции скорости ветра на опорных высотах 5 (точки), 100 (квадраты) и 150 м (треугольники) со скоростями ветра на других высотах для ПН «Тушино». Для высот 5 и 100 м указаны суммарные длительности выборок (в часах), по которым оценивались КЛК

му графикам КЛК отвечает высоте  $(2,4-3,0) \cdot H_b$ , находящейся в пределах, указанных в [17], и соответствует высоте городского подслоя шероховатости (граница URS).

### Зависимость межуровневой корреляции от скорости ветра на опорном уровне

В представленных выше результатах при оценках КЛК учитывались все наблюдавшиеся скорости ветра. Возникает вопрос, как изменятся характеристики городской атмосферы (например, границы высот подслоев приземного слоя атмосферы), если учитывать только достаточно сильные ветры? Для ответа на него были рассчитаны КЛК с использованием только тех скоростей ветра, которые превышали 4 м/с на опорной высоте 100 м. Полученные результаты показывают (рис. 6), что для ПН «Тушино» лишь в городском подслое шероховатости наблюдается заметное изменение (повышение) КЛК.

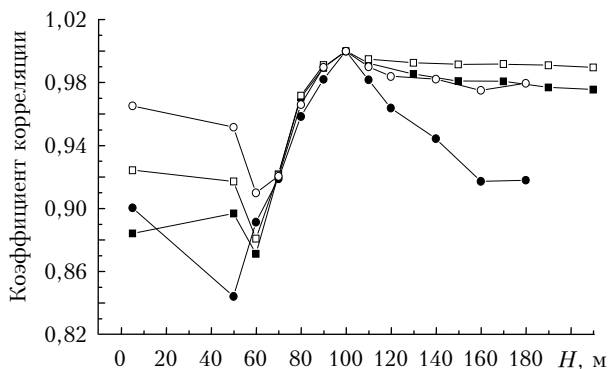


Рис. 6. Коэффициенты линейной корреляции скорости ветра на опорной высоте 100 м со скоростями ветра на других высотах. ПН «Тушино» — квадраты (темные — учитывались все ветры на опорной высоте, светлые — учитывался ветер, превышающий 4 м/с); ПН «Шаболовка» — точки (темные — учитывались все ветры на опорной высоте, светлые — учитывался ветер, превышающий 4 м/с)

При этом уровень приземного слоя атмосферы имеет тенденцию к понижению до высоты порядка 90 м, а уровень городского подслоя шероховатости, отвечающий локальному минимуму графика КЛК, остается прежним. На ПН «Шаболовка» изменения более значительны. Во-первых, при учете только больших скоростей ветра имеется тенденция к снижению уровня ASL до высоты примерно 110–120 м. Во-вторых, существенно повышается степень корреляции в области URS, а сама область распространяется на большую высоту (смещение локального минимума к уровню 60 м). Характерно, что в инерционном подслое коэффициенты корреляции практически не изменяются на обоих постах наблюдения.

### Заключение

Суммируя результаты анализа межуровневых корреляций скорости ветра с вариациями мезо-γ-масштаба и ориентируясь на схему «расслоения»

атмосферы над урбанизированной территорией, приведенную во введении, можно сделать следующие выводы (применительно к пунктам наблюдения в Москве):

- используя оценки коэффициентов межуровневой корреляции скорости ветра, можно оценить высоту приземного слоя атмосферы над урбанизированной территорией;

- существует минимум межуровневой корреляции, отвечающий высоте городского подслоя шероховатости;

- усиление скорости ветра приводит к повышению ее межуровневой корреляции внутри городского подслоя шероховатости, а также выше приземного слоя атмосферы, но в инерционном подслое величина межуровневой корреляции меняется слабо.

Следует отметить, что корреляция между различными компонентами вектора ветра в приземном слое атмосферы активно изучается многими исследователями. Однако основное внимание уделяется вторым моментам (центральный и смешанным), т.е. дисперсиям и корреляциям параметров на фиксированных высотах. Примером могут служить работы [12–15]. В частности, в работе [14] используются результаты содарных измерений для оценивания средних значений и вторых моментов компонентов скорости ветра на фиксированных уровнях в пределах 20–10 м. В то же время межуровневые корреляции исследованы в значительно меньшей степени [34, 38], хотя они могут предоставить, как показано выше, весьма полезную информацию для формирования моделей ПСА над урбанизированной территорией.

Авторы признательны руководству ГПУ «Мосэкомониторинг» за предоставленную возможность использовать экспериментальные данные диагностических комплексов для проведения исследований.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (Гос. контракт № 02.740.11.0674, 14.740.11.0204) и Проекта № 4.1 Президиума РАН.

1. Курбацкий А.Ф. Введение в моделирование турбулентного переноса импульса и скаляра. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2007. 331 с.
2. Бородулин А.И., Десятков Б.М. Моделирование распространения примесей в атмосферном пограничном слое. Новосибирск: Новосибир. гос. ун-т, 2007. 376 с.
3. Клепикова Н.В., Шнайман В.А., Бродская Н.С., Косых И.В., Трегубова М.В. Характеристики пограничного слоя атмосферы в условиях большого города // Метеорол. и гидрол. 1990. № 7. С. 54–63.
4. Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Моделирование распространения загрязнения воздуха в уличном каньоне // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 649–657.
5. Панасенко Е.А., Старченко А.В. Определение городских районов-загрязнителей атмосферного воздуха по данным наблюдений // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 3. С. 279–283.
6. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. Моделирование вертикальной структуры ночного пограничного слоя над шероховатой поверхностью // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 315–320.
7. Kraenhoff E.S., Voogt J.A. A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface

- temperatures // *Boundary-Layer Meteorol.* 2007. V. 123, N 3. P. 433–461.
8. *Soulhac L., Perkins R.J., Salizzone P.* Flow in a street canyon for any external wind direction // *Boundary-Layer Meteorol.* 2008. V. 126, N 3. P. 365–388.
  9. *Kastner-Klein P., Rotach M.W.* Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2004. V. 111, N 1. P. 55–84.
  10. *Kanda M., Moriizumi T.* Momentum and heat transfer over urban-like surfaces // *Boundary-Layer Meteorol.* 2009. V. 131, N 3. P. 385–401.
  11. *Hanna S., White J., Zhou Y.* Observed wind, turbulence, and dispersion in built-up downtown areas of Oklahoma City and Manhattan // *Boundary-Layer Meteorol.* 2007. V. 125, N 3. P. 441–468.
  12. *Al-Jiboori M.H., Xu Y., Qian Y.* Local similarity relationships in the urban boundary layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2002. V. 102, N 1. P. 63–82.
  13. *Al-Jiboori M.H.* Correlation Coefficients in Urban Turbulence // *Boundary-Layer Meteorol.* 2008. V. 126, N 2. P. 311–323.
  14. *Barlow J.F., Rooney G.G., von Hunerbein S., Bradley S.G.* Relating urban surface-layer structure to upwind terrain for the Salford Experiment (Salfex) // *Boundary-Layer Meteorol.* 2008. V. 127, N 2. P. 173–191.
  15. *Christen A., Rotach M.W., Vogt R.* The budget of turbulent kinetic energy in the urban roughness sublayer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2009. V. 131, N 2. P. 193–222.
  16. *Nelson M.A., Pardyjak E.R., Klewicki J.C., Pol S.U., Brown M.J.* Properties of the wind field within the Oklahoma City Park Avenue street canyon / Part I: Mean flow and turbulence statistics // *J. Appl. Meteorol. and Climatol.* 2007. V. 46, N 12. P. 2038–2045.
  17. *Nelson M.A., Pardyjak E.R., Brown M.J., Klewicki J.C.* Properties of the wind field within the Oklahoma City Park Avenue street canyon / Part II: Spectra, cospectra and quadrant analyses // *J. Appl. Meteorol. and Climatol.* 2007. V. 46, N 12. P. 2055–2073.
  18. *Rotach M.W.* Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon // *Atmos. Environ.* 1995. V. 29, N 13. P. 1773–1486.
  19. *Piringer M., Joffre S., Baklanov A., Cristen A., Deserti M., De Ridder K., Emeis S., Mestayer P., Tombrou M., Middleton D., Baumann-Stanzer K., Dandou A., Karppinen A., Burzynski J.* The surface energy balance and the mixing height in urban areas – activities and recommendations of COST-Action 715 // *Boundary-Layer Meteorol.* 2007. V. 124, N 1. P. 3–24.
  20. *Mestayer P.G., Durand P., Augustin P., Bastin S., Bonnefond J.-M., Bénéch B., Campistron B., Coppalle A., Delbarre H., Douset B., Drobinski P., Druillet A., Fréjafon E., Grimmond C.S.B., Groleau D., Irvine M., Kergomard C., Kermadi S., Lagouarde J.-P., Lemonsu A., Lohou F., Long N., Masson V., Moppert C., Noilhan J., Offerle B., Oke T.R., Pigeon G., Puysgrenier V., Roberts S., Rosant J.-M., Sannd F., Salmond J., Talbaut M., Voogt J.* The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): set-up and first results // *Boundary-Layer Meteorol.* 2005. V. 114, N 2. P. 315–365.
  21. *Исаев А.А., Каллистратова М.А., Локощенко М.А., Пекур М.С.* Термическая структура атмосферного пограничного слоя над Москвой // *Оптика атмосф. и океана.* 1994. Т. 7, № 5. С. 650–663.
  22. *Юшков В.П., Кузнецов Р.Д., Каллистратова М.А.* Средние профили скорости ветра в воздушном бассейне г. Москва // *Метеорол. и гидрол.* 2008. № 10. С. 24–33.
  23. *Локощенко М.А.* Динамика термической турбулентности в нижней атмосфере Москвы по данным содарного зондирования // *Метеорол. и гидрол.* 2006. № 2. С. 35–46.
  24. *Локощенко М.А.* Температурная стратификация нижней атмосферы в Москве // *Метеорол. и гидрол.* 2007. № 1. С. 53–64.
  25. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С.* Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // *Докл. РАН.* 2002. Т. 385, № 4. С. 541–548.
  26. *Вязанкин А.С., Вязанкин С.А., Жадин Е.А., Кадыгров Е.Н.* Анализ вертикального распределения температуры в пограничном слое атмосферы в пригороде и мегаполисе // *Метеорол. и гидрол.* 2003. № 7. С. 5–12.
  27. *Горчаков Г.И., Гладких В.А., Глядков П.С., Макиенко А.Э., Одицов С.Л., Озерейский Р.С.* Применение средств акустической диагностики нижнего слоя атмосферы для решения задач газообмена в городских условиях // *Сб. трудов XIX сессии Российского акустического общества.* М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 168–172.
  28. *Федоров В.А.* Измерение содаром «Волна-3» параметров радиальных компонент вектора скорости ветра // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16, № 2. С. 151–155.
  29. *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.
  30. *Федоров В.А.* К измерению содаром параметров динамической турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16, № 12. С. 1120–1125.
  31. *Федоров В.А.* К измерению содаром параметров модуля и направления горизонтальной скорости ветра // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 1–2. С. 91–99.
  32. *Федоров В.А.* Альтернативный метод вычисления круговых параметров вектора горизонтальной скорости ветра при содарных измерениях // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 10. С. 923–928.
  33. *Одицов С.Л., Федоров В.А.* Исследование вариаций скорости ветра мезометеорологического масштаба по содарным наблюдениям // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 11. С. 986–993.
  34. *Невзорова И.В., Одицов С.Л.* Корреляция компонентов скорости ветра в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 1–2. С. 124–129.
  35. *Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В.* Определение высоты внутреннего слоя перемешивания по измерениям содаров серии «Волна» // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 12. С. 1154–1159.
  36. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы.* 2009. № 7 (109). С. 21–25.
  37. *Гладких В.А., Макиенко А.Э., Одицов С.Л.* Экспериментальные исследования турбулентных потоков тепла в приземном слое атмосферы // *Аэрозоли Сибири. XI Рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН,* 2004. С. 30.
  38. *Комаров В.С., Ломакина Н.Я.* Особенности вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири. Часть 2. Характеристики вертикальной корреляции // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 11. С. 894–899.



*V.A. Gladkikh, A.E. Makienko, E.A. Miller, S.L. Odintsov.* **The study of parameters of the atmospheric boundary layer under urban conditions by means of local and remote diagnostics. Part 1. Inter-level correlations of the wind speed.**

We considered the results of the complex measurements of meteorological parameters at two observation sites in Moscow with the help of Volna-4 sodar, Meteo-2 ultrasonic meteorological station, and MTP-5 meteorological temperature profiler. The coefficients of the inter-level correlation of wind speed are analyzed after averaging of the initial data over 10-min time intervals. A minimum of correlation is identified, which corresponds to the height of the urban roughness sub-layer. We discuss the possibility of determining the height of the near-ground atmospheric layer over urbanized territory from estimates of the correlation coefficients. It is noted that an increase in the wind speed leads to the growth of the inter-level correlation inside the urban roughness sub-layer, as well as in the regions above the near-ground atmospheric layer; however, in the inertial sub-layer the correlation changes slightly.