

УДК 551.51:551.596

## РАЗЛИЧИЯ ПРОФИЛЕЙ ВЕТРА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НАД ГОРОДОМ И СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТЬЮ

М. А. Каллистратова<sup>\*)</sup>, М. С. Пекур<sup>\*\*)</sup>, В. П. Юшков

(кафедра физики атмосферы)

E-mail: yushkov@phys.msu.su

Приведены результаты синхронных дистанционных измерений профилей скорости ветра в атмосферном пограничном слое над Москвой и в сельской местности в 45 км от Москвы. Непрерывные измерения проводились в течение одного месяца доплеровскими акустическими локаторами (содачами). На высотах до 100 м обнаружены заметные как случайные, так и систематические отличия вертикального профиля скорости ветра в городском воздушном бассейне от загородного. Выше 150 м скорость и направление ветра в двух пунктах близки между собой.

### Введение

Определение ветрового режима города имеет большое значение для планирования размещения промышленных объектов и застройки жилых районов, для определения возможных ветровых нагрузок на здания и сооружения. Оперативные сведения о скорости и направлении ветра в слое перемешивания необходимы в качестве входных данных для краткосрочного прогнозирования приземных концентраций загрязняющих примесей с помощью дисперсионных моделей. В настоящее время разработан целый класс моделей распространения примесей в атмосфере города (бокс-модели), которые непосредственно используют пропорциональность концентрации примеси  $C$  «параметру вентиляции»  $(HV)^{-1}$ , где  $H$  — высота слоя перемешивания, а  $V$  — средняя скорость ветра в этом слое [1]. Зависимость  $C$  от скорости ветра над Москвой была экспериментально подтверждена в работах [2, 3].

Сведения о поле ветра в городе обычно ограничены данными наземных метеостанций, расположенных на территории города и в пригородах, а также данными аэрологического зондирования, проводимого на значительном удалении от городского центра. Изменения, вносимые городом в локальную структуру атмосферного пограничного слоя, могут оказывать значительное влияние на поле скорости ветра, поэтому необходимо специально исследовать степень репрезентативности загородных данных для городского воздушного бассейна.

Во многих странах поле ветра над городами исследовалось путем дистанционного акустического зондирования с помощью доплеровских звуковых локаторов (содагов) [4–6]. Имеются даже специальные городские метеостанции, оборудованные доплеровскими содачами для мониторинга поля ветра [7, 8]. В нескольких городах, например, в Риме [9] и в Париже [10, 11], с помощью содарных сетей

проводились синхронные измерения скорости ветра в черте городской застройки и в прилегающей сельской местности. Однако такие исследования немногочисленны, и их результаты не могут быть достоверно обобщены на другие регионы и города.

В данной работе изложены результаты и анализ синхронных дистанционных измерений профилей скорости ветра, проводившихся в 1993 г. в атмосферном пограничном слое над Москвой и в сельской местности в 45 км от Москвы. Краткое изложение предварительных результатов этих измерений было опубликовано в трудах конференции [12].

### 1. Методика и условия эксперимента

Физические принципы акустического зондирования поля ветра и параметры трехкомпонентного доплеровского моностатического содара «Латан-1», два идентичных экземпляра которого использовались в данном эксперименте, подробно описаны в работе [13]. Отметим здесь, что эхо-сигнал моностатического содара определяется обратным (под углом  $180^\circ$ ) рассеянием звуковых волн на мелко-масштабных турбулентных неоднородностях температуры. В тех областях, где интенсивность температурных флуктуаций мала (например, выше верхней границы слоя приземной инверсии, где термическая стратификация близка к нейтральной) содарные измерения скорости ветра не могут быть выполнены вследствие низкого отношения сигнала к шуму. Эта особенность дистанционных измерений (присущая также радарам и лидарам) ограничивает высотный диапазон сопоставлений скорости ветра, поскольку высота инверсий в сельской местности заметно ниже чем в городе [3].

Один пункт зондирования располагался на крыше трехэтажного здания Института физики атмосферы им. А. М. Обухова (ИФА РАН) в центре Москвы.

<sup>\*)</sup> Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН.

<sup>\*\*)</sup> Аргоннская национальная лаборатория, США.

Второй пункт располагался на территории Звенигородской научной станции (ЗНС) ИФА РАН. ЗНС находится в сельской местности недалеко от г. Звенигорода в 45 км к западу от Москвы. Удаленность этого пункта была достаточной для того, чтобы ни при каком направлении ветра его не достигал «шлейф» городского острова тепла, и в то же время позволяла не учитывать различие синоптических условий в двух пунктах.

Круглосуточные измерения в обоих пунктах проводились в период с 14 октября по 5 ноября. Измерения вертикальных профилей скорости  $V$  и направления  $\varphi$  ветра проводились с временем осреднения 40 мин в начале каждого часа, за исключением пропусков сроков из-за сильных осадков или по техническим причинам. Сильный акустический шум от движения автотранспорта в центре Москвы в дневные часы нередко ограничивал высоту достоверного определения значений  $V$  и  $\varphi$  до 150–200 м, а нижняя граница зондирования лимитировалась паразитными отражениями от зданий. Диапазон зондирования на ЗНС в ночные часы ограничивался пределами низкоуровневых инверсий, выше которых турбулентные флуктуации, необходимые для получения эхо-сигнала, практически отсутствовали. Поэтому для сохранения постоянства объема выборки из доступного в каждом пункте диапазона высот зондирования было выбрано только четыре интервала, наиболее полно характеризующих профиль ветра и изменение акустического сигнала в суточном цикле при возникновении и разрушении инверсионных слоев и конвективных структур. Средние высоты каждого интервала составляли соответственно 69, 98, 142 и 186 м. Таким образом, значения измеряемых величин осреднялись по высотным интервалам 30–40 м. Для сравнения использовались синхронные наблюдения в Москве и на ЗНС с достаточным

уровнем отношения сигнал/шум для всех выбранных высот.

Осенний период наблюдений характеризовался незначительным суточным ходом скорости ветра и температуры и слабоустойчивой, либо слабонеустойчивой термической стратификацией. В это время года нет сильного влияния переходных процессов в утренние и вечерние часы, в течение которых в летнее время происходит резкая перестройка профиля скорости ветра. Поэтому в условиях эксперимента различия в типе стратификации в двух пунктах определялись скорее городским «островом тепла», чем различием местоположения пунктов или синоптическими процессами. Тем не менее полное совпадение типов стратификации (которое оценивалось по виду содарного эхо-сигнала на факсимильной регистрации) наблюдалось лишь в 60–70% общего времени наблюдений.

## 2. Результаты сопоставлений скорости ветра в Москве и сельской местности

На рис. 1 показаны примеры сопоставления отдельных вертикальных профилей скорости ветра, синхронно измеренных в двух пунктах. Профили на графике (а) близки между собой, отличаясь на разных высотах в диапазоне  $\pm 1$  м/с, а на графике (б) сильно отличаются по наклону либо по величине. Такие сильные отличия профилей, превышающие 2–3 м/с, наблюдались примерно в 10% всех случаев, соответствуя периодам, когда эхограммы сигнала содара также значительно различались. Эти различия связаны, по-видимому, с локальными возмущениями скорости, а не отражают влияния городской среды, поскольку они имеют короткое время существования и приводят лишь к случайному разбросу данных при их сравнении.

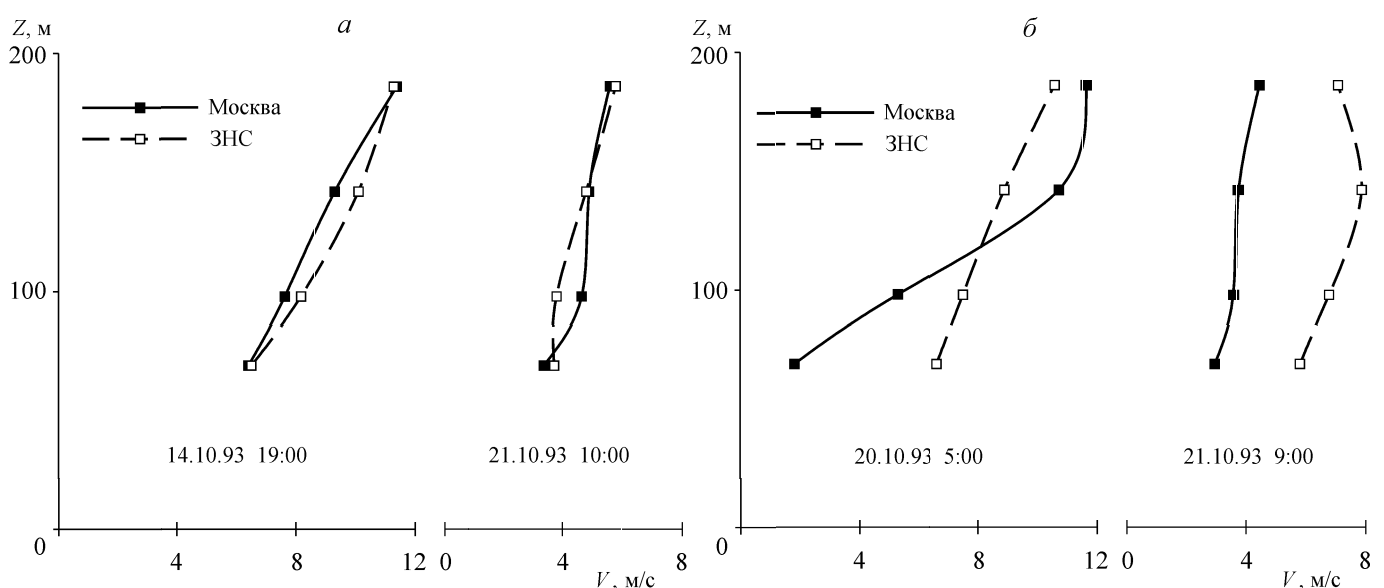


Рис. 1. Примеры синхронных вертикальных профилей скорости ветра в центре Москвы и на ЗНС в близких (а) и существенно различных (б) условиях

На рис. 2 данные измерений скорости ветра на всех высотах в Москве  $V_M$  и на ЗНС  $V_Z$  представлены в виде корреляционного графика. Коэффициент корреляции  $R: R(V_M, V_Z) \equiv \frac{(V_M - \langle V_M \rangle)(V_Z - \langle V_Z \rangle)}{\sigma_{V_M} \sigma_{V_Z}} = 0.81$  является весьма высоким с учетом пространственного разнесения пунктов измерений и небольшого диапазона изменения скорости (от 2 до 13 м/с). На графике видно систематическое занижение скорости ветра приблизительно на 1 м/с в центре Москвы по сравнению с сельской местностью.

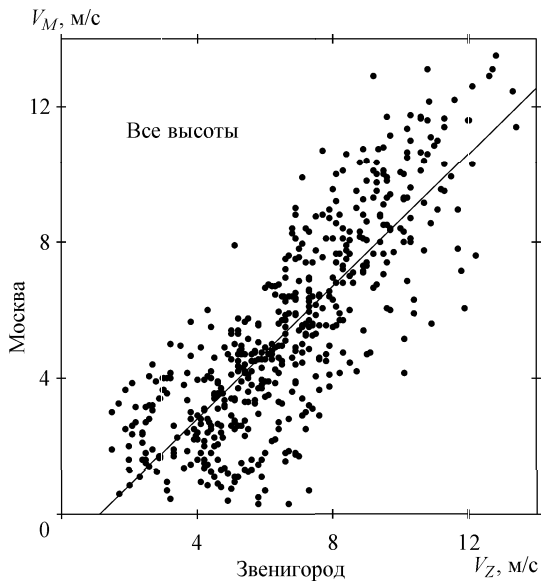


Рис. 2. Корреляционная диаграмма наблюдений скорости ветра в Москве и на ЗНС на всех высотах. Приведена прямая линейной регрессии

На рис. 3 представлены корреляционные графики отдельно для каждой высоты, а значения коэффициентов линейной регрессии  $V_M = AV_Z + B$  и коэффициентов корреляции представлены в таблице. Напомним, что высота измерения  $h$  относится к центру объема, по которому происходит пространственное осреднение измеряемой содаром скорости ветра.

**Коэффициенты линейной регрессии и корреляции**

Высота измерения $h$ , м	69	98	142	186	все высоты
$A$	0.75	0.85	0.88	0.96	0.97
$B$ , м/с	-0.79	-0.11	-0.01	-0.50	-1.10
$R$	0.63	0.72	0.79	0.87	0.81

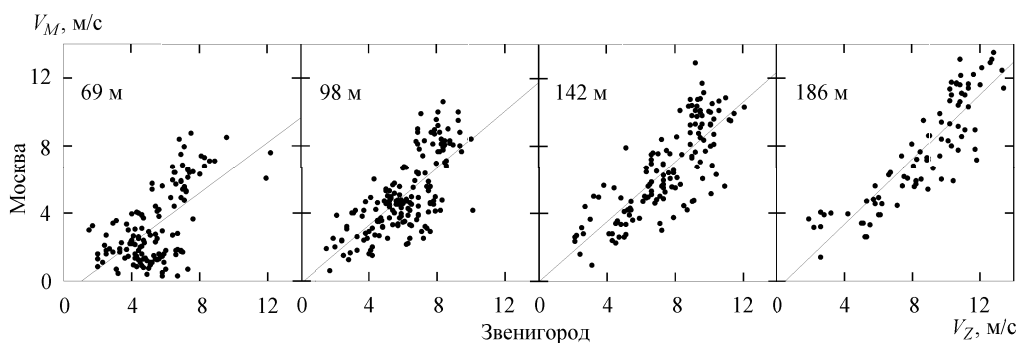


Рис. 3. Корреляционные диаграммы синхронно измеренной скорости ветра в центре Москвы и на ЗНС

Из графиков и таблицы видно, что с ростом высоты над подстилающей поверхностью различия в скорости ветра уменьшаются и соответственно увеличивается коэффициент корреляции.

Поскольку для ночных наблюдений характерна более частая повторяемость инверсий, а в дневных наблюдениях складываются условия, благоприятствующие конвекции (весьма слабой в период наблюдений), представляет интерес разделение данных наблюдений по времени суток.

Среди всех одновременных наблюдений были отобраны данные с 9 до 17 ч местного времени для дневного, и с 21 ч до 5 ч утра для ночного периодов измерений. Профили, относящиеся к каждой категории, усреднялись вне зависимости от значения средней скорости ветра. Однако для обеспечения однородности статистической выборки на графиках рис. 4 использовались данные лишь для тех случаев, в которых скорость ветра в обоих пунктах была измерена на всех четырех высотах. В результате такой отбраковки были учтены лишь те условия, когда термическая стратификация в пределах высотного диапазона зондирования совпадала в обоих пунктах.

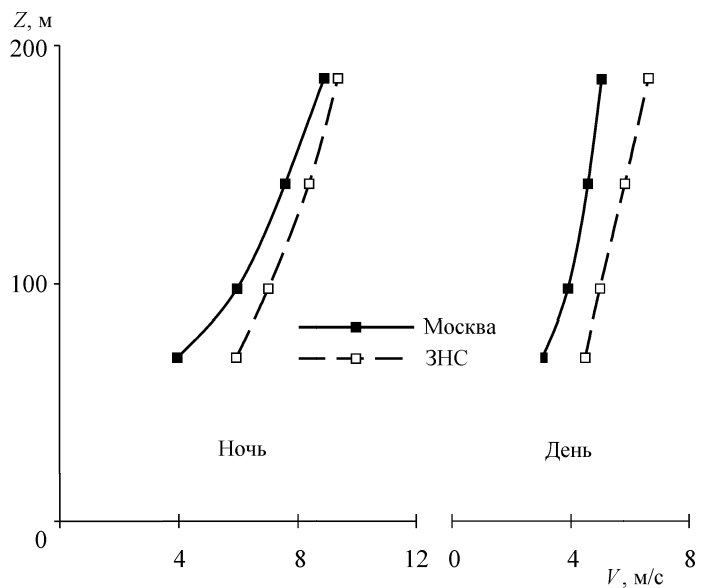


Рис. 4. Осредненные за весь период наблюдений профили скорости ветра в дневных и ночных условиях

Как видно на рис. 4, усредненные профили для двух пунктов достаточно похожи. Высотная зависимость скорости ветра, близкая к линейной как в ночные, так и в дневные часы, характерна для осеннего сезона с низкой конвективной активностью. В ночные часы усредненный профиль скорости ветра в городе имеет несколько больший наклон, в то время как днем его наклон меньше, чем у загородного профиля. Отличия средней скорости днем больше, чем в ночные часы, однако они не превышают 1.5 м/с.

Разница между направлением скорости ветра в центре Москвы и за городом представлена на рис. 5 для трех верхних уровней диапазона зондирования. Направления ветра на нижнем уровне различаются сильнее: примерно в 10% случаев различия в направлении ветра достигают  $30^\circ$  (при 40-минутном осреднении). На графике заметен небольшой систематический сдвиг направления «против часовой стрелки» (отрицательные значения), связанный, по-видимому, с большей силой трения в городе, особенно на малых высотах. Однако в целом этот график показывает, что город не оказывает заметного влияния на направление ветра на высотах 100–200 м.

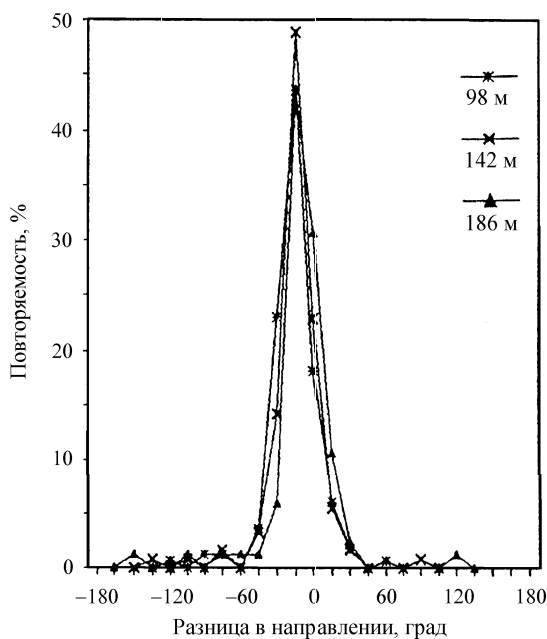


Рис. 5. Осредненная по всем измерениям разница  $\Delta\varphi$  между направлением ветра в Москве и на ЗНС:  $\Delta\varphi = \varphi_M - \varphi_Z$

### 3. Обсуждение результатов

Анализ результатов сравнения показал, что в нижней части пограничного слоя скорость ветра над городской застройкой в среднем меньше, чем над сельской местностью. Такое уменьшение связано, по-видимому, не столько с городским «островом тепла», сколько с большей эффективной высотой шероховатости в городе, поскольку в осенний период, когда проводились измерения, нагрев города солнечным излучением и внутренними источниками невелик.

Большинство (около 90%) наблюдений показывают устойчивую закономерность различий скорости ветра между городом и пригородом. Относительно редкие случаи существенных различий формы профилей скорости ветра в двух точках наблюдений вызваны, очевидно, локальными возмущениями скорости ветра, и их образование вряд ли можно объяснить влиянием городской среды. С другой стороны, присутствие таких возмущений свидетельствует о полезности содарного мониторинга скорости ветра в черте города для отслеживания потенциально опасных метеорологических ситуаций и получения данных для краткосрочного оперативного прогноза.

Выявлены следующие отличия профилей скорости: изменение наклона профиля в суточном цикле; более быстрое уменьшение скорости ветра на высотах ниже 100 м в городской среде; большая дисперсия разницы скорости ветра над городом и над сельской местностью на малых высотах. Эти закономерности в целом согласуются с данными [14] — единственной известной нам публикацией по сопоставлению скорости ветра в пограничном слое над Москвой и вдали от мегаполиса. Однако различия, выявленные в работе [14] по измерениям на Останкинской и Обнинской башнях, нельзя полностью отождествлять с влиянием городской среды ввиду большого разнесения пунктов наблюдений.

По данным наших измерений, скорость ветра в Москве в среднем на 1 м/с ниже чем в ближнем Подмосковье на тех же высотах над подстилающей поверхностью. Этот вывод не относится к малым высотам, сравнимым с высотой зданий. Неоднократно отмечалось (см., напр., обзор [15]), что на малых высотах поле ветра в городе обладает большой пространственной изменчивостью, связанной с влиянием уличных каньонов и турбулентными завихрениями вокруг высоких зданий. Большая дисперсия различий скорости ветра на нижних высотах зондирования (рис. 4) подтверждает этот факт и свидетельствует о том, что обобщение различий на высотах до 100 м (например, по данным невысоких метеорологических мачт) является малоперспективной задачей. Поэтому же метеорологи чаще используют не данные о приземном ветре, а так называемый геострофический ветер, определяемый по полю давления. Таким образом, в городских условиях содарные наблюдения остаются едва ли не единственным средством оперативного контроля агеострофических отклонений скорости ветра, возникающих при циклогенезе и прохождении фронтов.

### Заключение

Использование дистанционного акустического зондирования позволило провести синхронные измерения профилей скорости ветра над центром Москвы и над прилегающей сельской местностью. Ранее подобных сопоставлений в Москве не проводилось, и их трудно осуществить другими методами. Только

одновременные измерения в нескольких точках способны дать картину пространственной изменчивости поля ветра, обусловленную как городской застройкой, так и влиянием городского «острова тепла». Эта задача, решаемая во многих крупных городах мира, для Москвы до сих пор остается актуальной.

Полученные результаты показали, что в осенний сезон поле ветра в нижней части пограничного слоя достаточно однородно. Это заключение существенно для организации мониторинга метеорологических условий, влияющих на накопление и ближний перенос загрязняющих примесей.

Отметим, что данные, полученные в течение трех недель наблюдений, не могут служить основанием для окончательных выводов, а призваны лишь проиллюстрировать возможную ситуацию, показать насколько данные реальных измерений в центре большого города могут отличаться от результатов наблюдений в ближайших пунктах и стать первой частью более длительной программы изучения поля ветра в атмосферном пограничном слое над Москвой. Для более обоснованных выводов необходимо проведение подобных измерений и в другие сезоны года.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-05-64786, 04-05-64167). Авторам хотелось бы особенно поблагодарить Е. А. Шурыгина за помощь в получении данных наблюдений на Звенигородской станции ИФА РАН.

#### Литература

1. *Juda-Rezer K.* // Encyclopedia of Environment Control Technology / Ed. P.N. Cheremisinoff. Gulf Publishing. 1989. **2**. P. 83.

2. *Копейкин В.М., Капустин В.Н., Пекур М.С.* // Изв. РАН. ФАО. 1993. **29**. С. 198.
3. *Pekour M.S., Kallistratova M.A.* // Appl. Phys. B. 1993. **57**. P. 49.
4. *Lalas D.P., Asimakopoulos D.N., Deligiorgi D.G., Helmis C.G.* // Atmos. Environ. 1983. **17**. P. 1621.
5. *Castracane P., Selmi L., Casadio S.* et al. // Phys. Chem. of the Earth. Part B. 2001. **26**. P. 239.
6. *Piringer M., Baumann K.* // Phys. Chem. of the Earth. Part B. 2001. **26**. P. 881.
7. *Walczewski J.* // Wiad. IMGW (Reports of IMWM). 1994. **17**. P. 91.
8. *Cassardo C., Forza R., Manfrin M.* et al. // Proc. 11th Int. Symp. Acoust. Remote Sensing. Rome, 2002. P. 311.
9. *Mastrantonio G., Viola A., Argentini S.* et al. // Bound. Layer Meteorol. 1994. **71**. P. 67.
10. *Dupont E., Menut L., Carissimo B.* et al. // Atmos. Environ. 1999. **33**. P. 979.
11. *Troude E.D., Carissimo B., Flossmann A.I.* // Bound. Layer Meteorol. 2002. **103**. P. 493.
12. *Kallistratova M.A., Pekour M.S.* // Proc. 7th Int. Symp. Acoust. Remote Sensing. Boulder. 1994. P. 713.
13. *Юшков В.П., Каллистратова М.А., Караваева Е.В.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2003. № 5. С. 47 (Moscow University Phys. Bull. 2003. N 5. P. 61).
14. *Бызова Н.Л., Хачатурова Л.М.* // Тр. ЦВГМО. 1984. **20**, № 1. С. 3.
15. *Roth M.* // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2000. **126**. P. 941.

Поступила в редакцию  
21.09.04