

Исследование параметров пограничного слоя атмосферы в городских условиях с помощью средств локальной и дистанционной диагностики. Часть 2. Температура воздуха и поток тепла

В.А. Гладких¹, А.Э. Макиенко¹, Е.А. Миллер², С.Л. Одинцов^{1*}

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

²Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 7.07.2010 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. Проанализированы повторяемость и высоты границ температурных инверсий в условиях лесопарковой зоны. Проведено сравнение полученных результатов с аналогичными оценками других авторов для центральной части города. Установлено, что в лесопарковой зоне города устойчивая стратификация городского подслоя шероховатости реализуется значительно чаще, чем в центральной части урбанизированной территории.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, температура, температурный профилимер, турбулентный поток тепла, скорость ветра, коэффициент корреляции, акустическая диагностика; atmospheric boundary layer, temperature, temperature profiler, turbulent heat flow, wind speed, correlation coefficient, acoustic diagnostics.

Введение

В первой части статьи были обозначены цели исследований и рассмотрены межуровневые корреляции скорости ветра пограничного слоя атмосферы (ПСА) над Москвой. Продолжение работы связано с анализом профилей температуры воздуха в ПСА и некоторых турбулентных характеристик вблизи подстилающей поверхности. В статье обсуждаются результаты измерений характеристик ПСА на двух постах наблюдения (ПН) на территории Москвы: пост наблюдения в северо-западной части города «Метеостанция Тушино» (ПН «Тушино») и пост наблюдения в центре города на ул. Шаболовка (ПН «Шаболовка»). Характеристики этих постов приведены в [1].

На ПН «Шаболовка» измерения проводились с 30 мая по 6 июля 2006 г. Привлекались данные ультразвуковой метеостанции (УЗМ) «Метео-2» (высота размещения 5 м; измерения температуры, влажности и давления воздуха, а также компонентов скорости ветра с периодичностью примерно 10 раз за 1 с) и содара «Волна-4» (оценка высоты слоя интенсивного турбулентного теплообмена и высотнo-временных профилей компонентов скорости ветра; контро-

лируемый диапазон высот 50–500 м; периодичность получения одного «мгновенного» профиля около 9 с; шаг по высоте 10 м).

На ПН «Тушино» измерения проводятся на регулярной основе с июня 2006 г. Помимо УЗМ «Метео-2» и содара «Волна-4», используется метеорологический температурный профилимер МТП-5 (измеряются профили температуры с шагом по времени 5 мин и по высоте 50 м; контролируется диапазон высот до 600 м).

Температура воздуха

Температуру воздуха на разных высотах можно было оценить только на ПН «Тушино», поскольку лишь здесь работал температурный профилимер. В данной статье не будем углубляться в анализ процессов изменения температуры, поскольку их исследование составляет отдельный класс задач. Рассмотрим лишь результаты, касающиеся сопоставления особенностей структуры ПСА в двух разнесенных пунктах наблюдений на территории Москвы.

На рис. 1, а представлены изменения температуры на высотах 5, 100 и 600 м для периода с 24 по 30 сентября 2007 г. В этом эпизоде суточный ход температуры на высоте 600 м выражен существенно слабее, чем на высотах 5 и 100 м. Такое поведение профиля температуры является достаточно типичным для ПН «Тушино» в теплое (и сухое) время года.

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

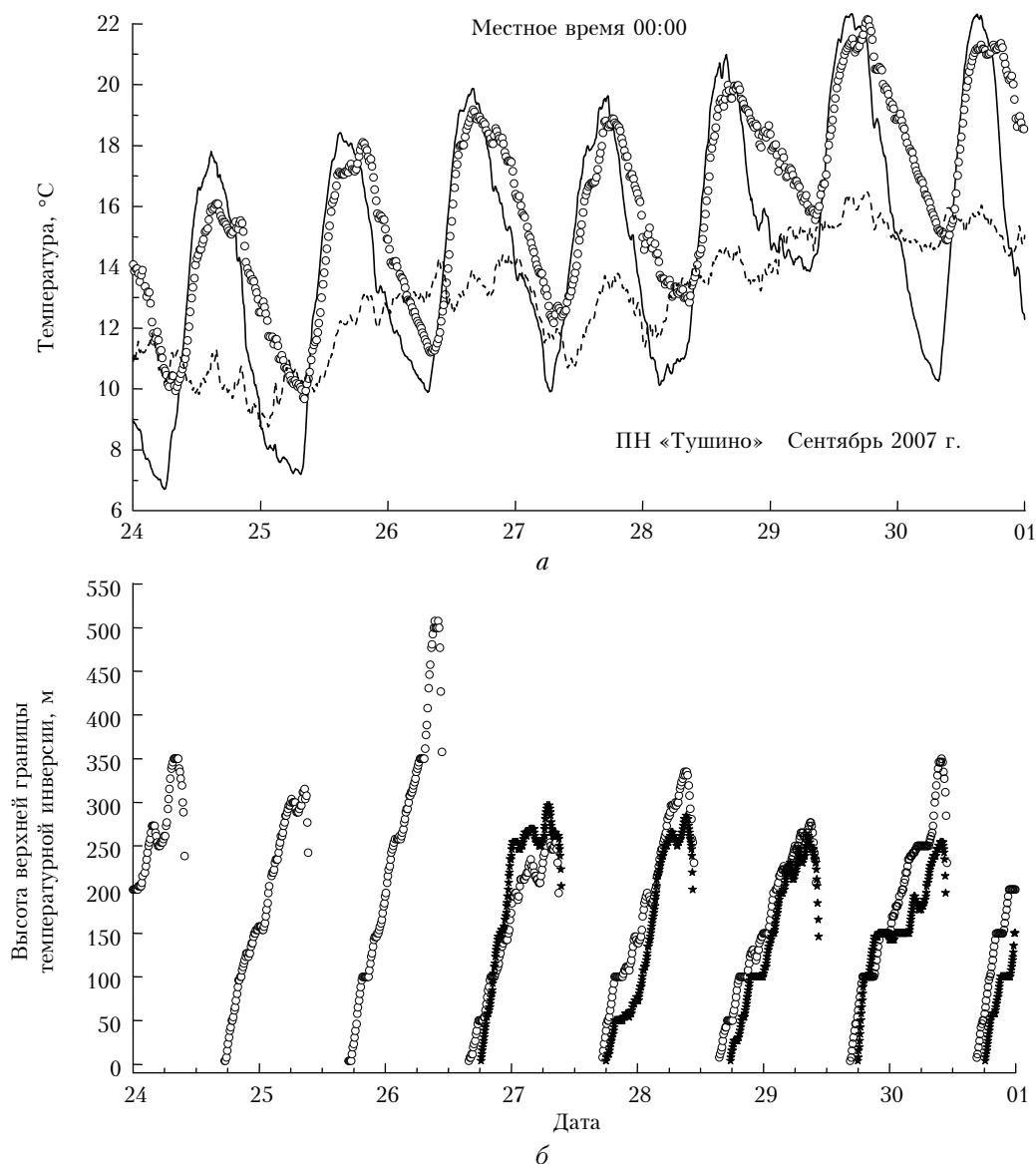


Рис. 1. Температура воздуха: *a* — изменения температуры на разных высотах для ПН «Тушино» 24–30 сентября 2007 г.: сплошная линия — 5 м, кружочки — 100 м, штриховая линия — 600 м; *б* — высота верхней границы инверсии температуры на ПН «Тушино» (кружочки) и на ПН «Долгопрудный» (звездочки)

В рассмотренном эпизоде происходили регулярное образование и последующий распад радиационных (ночных) температурных инверсий, нижние границы которых примыкали к земной поверхности (до начала процесса их разрушения под воздействием конвективных потоков тепла), а верхние границы достигали 250–350 м (рис. 1, б). Примерно этот же диапазон высот наблюдался и в другие дни сентября 2007 г. Лишь в трех случаях за этот месяц высота верхней границы инверсии достигала 500–600 м.

Характерным для приведенного эпизода (с 24 по 30 сентября 2007 г.) является длительное присутствие инверсий температуры (включая приземные и приподнятые) — до 73% от всего времени наблюдений (163 ч). По всей выборке за сентябрь 2007 г. повторяемость инверсий составила 48% (331 ч из 687 ч наблюдений; из них 303 ч наблюдалась приземная

инверсия). Максимальная разность температур на границах инверсий достигала 7,5 °C. При этом разрушение инверсий происходило достаточно быстро. Например, по представленному на рис. 1, б эпизоду — за 0,2–1,5 ч после «отрыва» нижней границы от уровня 5 м (исключение составляет 26 сентября 2007 г., когда этот процесс продолжался больше 2 ч). Отметим, что инверсия температуры идентифицировалась нами по знакам градиента «мгновенного» дискретного профиля температуры. Возможно, после дополнительной обработки исходных профилей (например, путем их сглаживания и интерполяции) статистика характеристик инверсий может несколько измениться.

Особо подчеркнем, что на ПН «Тушино» образование инверсии температуры начиналось непосредственно у земной поверхности. Этот факт говорит

о том, что ночью для «городского покрова» (модель «расслоения» атмосферы см. в [1]) на ПН «Тушино», в отличие от ПН «Шаболовка», типичным является отрицательный вертикальный турбулентный поток тепла. Именно он приводил к образованию приземных температурных инверсий. Турбулентные потоки тепла на постах наблюдения «Тушино» и «Шаболовка» более подробно обсуждаются на с. 990–993 настоящей статьи.

Особенности образования и характеристики инверсий температуры над центральной частью Москвы приведены в работе [2], где также использовался температурный профиломер МТП-5. Согласно результатам [2] (рис. 2, сплошная линия) повторяемость инверсий в центре Москвы меньше, чем это прогнозируется существующими методиками (результаты прогноза отображены на рис. 2 штриховой линией).

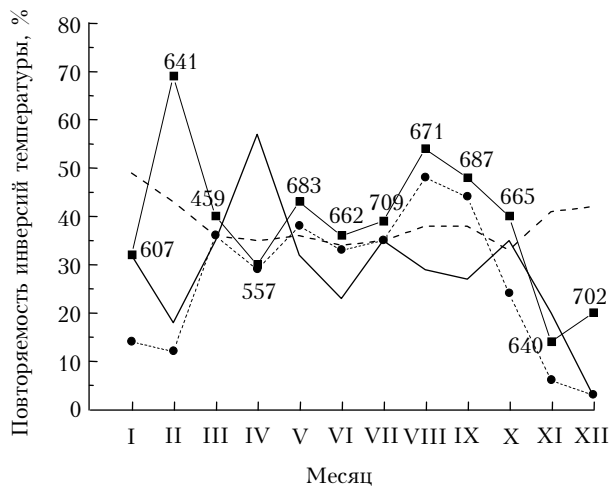


Рис. 2. Повторяемость температурных инверсий (длительность присутствия инверсий в период месячного наблюдения) в ПН «Тушино» в течение 2007 г. и в центре Москвы в 2000–2001 гг. По оси абсцисс указан только 2007 г. Для ПН «Тушино»: точки — приземные инверсии, квадраты — инверсии всех типов (цифры — длительность периода наблюдений в течение месяца в часах). Для центра Москвы (по [2]): сплошная линия — наблюдения, штриховая линия — расчетные значения

Для подтверждения типичности такой ситуации в крупных городах можно сослаться на работу [3], в которой на основе экспериментальных данных (Цюрих, Швейцария) установлено, что в городском подслое шероховатости устойчивая стратификация практически не образовывалась (лишь в нескольких зимних эпизодах).

Повторяемость температурных инверсий над ПН «Тушино» в 2007 г. приведена на рис. 2 в виде линий с символами. Представлены оценки длительности присутствия температурной инверсии в течение 1 мес без разделения на типы инверсий (квадраты), а также длительность существования только приземных инверсий (точки). Отметим достаточно быстрое разрушение инверсий в теплое время года (особенно в апреле). Повторяемость инверсий над ПН «Тушино» в 2007 г. согласуется с результатами [2], полу-

ченными в 2000–2001 гг. (см. рис. 2). Как и ожидалось, повторяемость инверсий в центре Москвы меньше, чем над ПН «Тушино», хотя эта закономерность в отдельные месяцы нарушается (сравниваются результаты разных лет!).

Следует обратить внимание на особенность изменения высоты верхней границы температурной инверсии H_i на ПН «Тушино» (см. рис. 1, б): в период распада инверсии происходит заметное понижение высоты H_i . Подобное поведение H_i является типичным в тех случаях, когда наблюдается «классический» суточный ход изменения температуры в ПСА. Отчасти за счет этого эффекта разрушение инверсии происходит ускоренно. При этом «проседание» H_i начинается достаточно синхронно с процессом отрыва нижней границы инверсии от поверхности. Следует подчеркнуть, что такое изменение H_i является присущим не только для ПН «Тушино». Например, на рис. 1, б приведены синхронные измерения H_i в г. Долгопрудный (к северу от Москвы). Несмотря на значительное расстояние между данными пунктами наблюдений, однотипность изменения верхней границы температурной инверсии в процессе ее распада очевидна. На подобное поведение H_i до сих пор, насколько нам известно, внимание в специализированной литературе не обращалось. Возможно, отмеченная особенность связана с турбулентным разрушением инверсии не только со стороны ее нижней границы, но и сверху.

Необходимо также отметить, что в некоторых случаях разрушение инверсии происходит без отрыва ее нижней границы от подстилающей поверхности, т.е. инверсия как бы «тает» (при этом верхняя граница постепенно опускается к подстилающей поверхности).

Основным выводом по данному разделу можно считать то, что в пределах городской черты Москвы могут существовать разнообразные вертикальные распределения температуры воздуха. В частности, на ПН «Тушино» присутствие *приземных* инверсий температуры является достаточно частым событием даже в теплое время года. Это отличает его от пунктов наблюдений в центральной части урбанизированной территории, где устойчивая стратификация в городском подслое шероховатости реализуется редко [2–4].

Такая «пятнистость» территории Москвы по градиентам температуры нижнего слоя атмосферы должна учитываться при моделировании потоков тепла и импульса, газо-аэрозольных выбросов и других контролируемых субстанций.

Следует отметить, что за период 2006–2009 гг. на ПН «Тушино» проведено более 25 000 ч наблюдений профиля температуры с шагом по времени 5 мин и с шагом по высоте 50 м в диапазоне высот до 600 м. Кроме того, за этот период измерены средние и турбулентные характеристики полей температуры и ветра на уровнях 5 и 7 м, а также получены эпизодические данные с использованием содара по структуре слоя интенсивного турбулентного теплообмена (в пределах 50–500 м) и профилям компонентов скорости ветра в этом слое.

Вторые моменты температуры и вертикального ветра

Измеряемые содаром и УЗМ компоненты скорости ветра несут в себе информацию не только о средних значениях, но и о турбулентных характеристиках. УЗМ «Метео-2» способна обеспечить получение данных с периодичностью порядка 10 отсчетов за 1 с, в то время как содар «Волна-4» восстанавливает один «мгновенный» профиль скорости ветра с периодичностью порядка 9 с (при высоте зондирования до 500 м). Благодаря этому данные УЗМ пригодны для анализа достаточно широкого спектра пульсаций компонентов скорости ветра и температуры, а данные содара могут предоставить информацию только о низкочастотной составляющей турбулентности, которая тем не менее содержит значительную часть энергии потоков. Следует отметить, что УЗМ различных типов активно используются для оценок статистических характеристик метеорологических параметров в нижнем слое атмосферы и являются в настоящее время основным инструментом для исследования термодинамических процессов в городских условиях (см., например, [5–7]).

Рассмотрим некоторые результаты анализа вертикального турбулентного потока тепла Q_S , среднеквадратических отклонений температуры $\sigma_{T,S}$ и вертикальной составляющей вектора ветра $\sigma_{w,S}$ на уровне 5 м, а также их связь со скоростями ветра на вышележащих уровнях. Перечисленные параметры определялись нами за 10-минутный интервал времени. Интерес к ним связан в том числе с тем, что поток тепла Q_S может служить «индикатором на-

правленности» процессов перераспределения примесей в приземном слое атмосферы (увеличение или уменьшение их концентрации), а $\sigma_{T,S}$ и $\sigma_{w,S}$ могут характеризовать интенсивность этих процессов.

Турбулентный поток тепла Q_S вычислялся по данным УЗМ с использованием формулы $Q_S = \bar{\rho} c_p \overline{w'T'}$ (Вт/м²), где $\bar{\rho}$ – плотность воздуха; w' и T' – турбулентные составляющие вертикального ветра и температуры соответственно; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; черта над символами – знак осреднения по времени. Некоторые детали и результаты определения Q_S с помощью УЗМ «Метео-2» опубликованы в [8].

Пример изменений Q_S и температуры воздуха в июне 2006 г. на ПН «Шаболовка» представлен на рис. 3.

Видно, что изменение Q_S в целом совпадает с поведением температуры в течение суток. При этом общее (синоптическое) изменение температуры слабо влияет на его величину. Факт слабой зависимости Q_S от среднего значения температуры воздуха на урбанизированной территории уже отмечался другими авторами (см., например, [9]). Более детально суточную изменчивость температуры и Q_S можно увидеть на рис. 4, где представлен фрагмент рис. 3 с 20 по 24 июня 2006 г.

Необходимо отметить сдвиг фазы наступления максимумов температуры и потока Q_S : максимум температуры задерживается по времени относительно максимума Q_S . Это становится особенно явным в тех случаях, когда изменчивость Q_S достаточно гладкая. Подобная ситуация наблюдалась и на ПН «Тушино». Она характерна также и для других регионов [10].

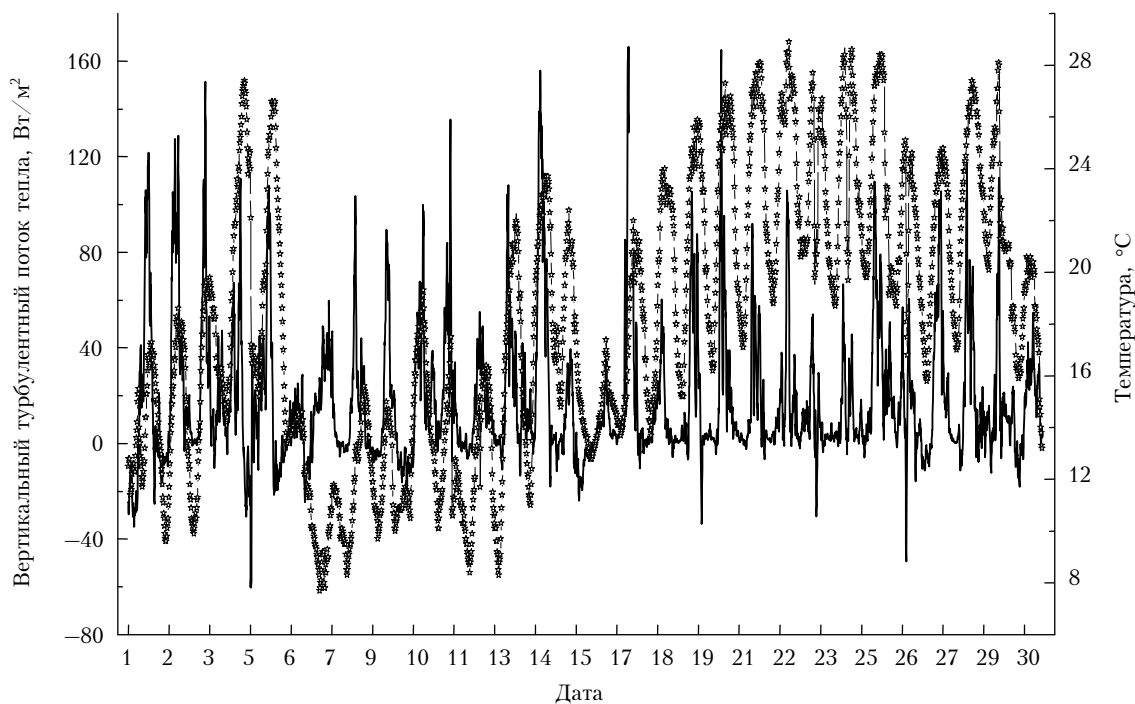


Рис. 3. Пункт наблюдения «Шаболовка». Июнь 2006 г. Поток тепла (линия) и температура воздуха (звездочки) на высоте 5 м

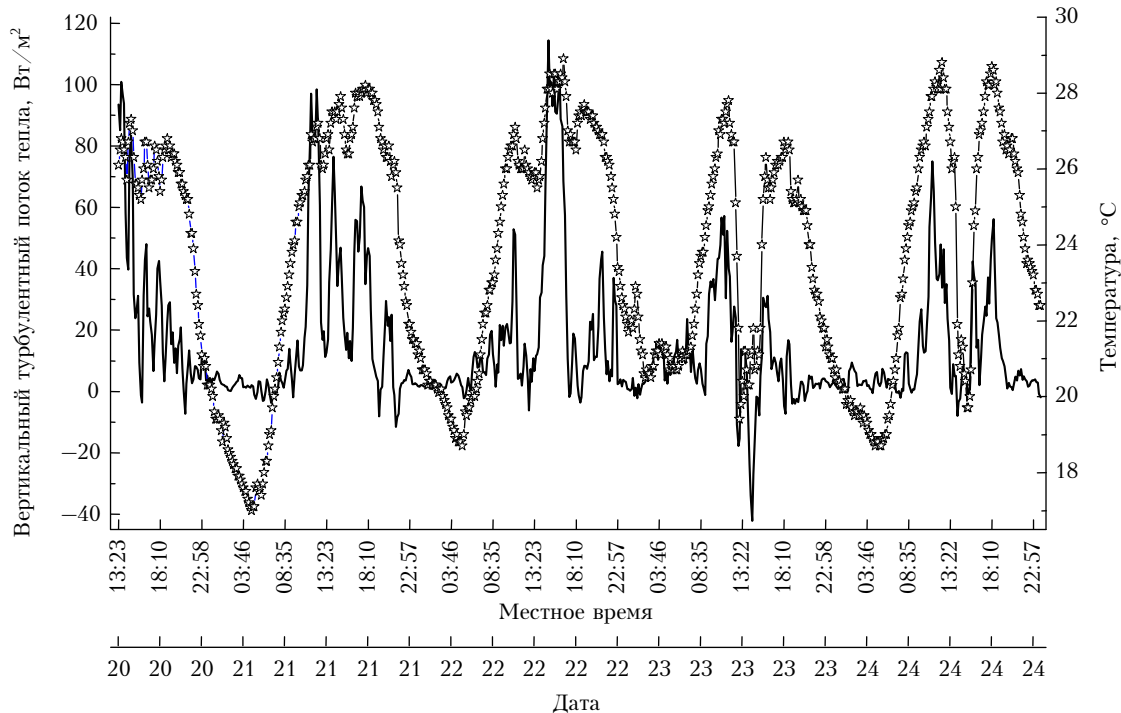


Рис. 4. Пункт наблюдения «Шаболовка». 20–24 июня 2006 г. Поток тепла (звездочки) и температура воздуха (линия) на высоте 5 м

Отрицательные потоки тепла на уровне 5 м на ПН «Тушино» наблюдаются чаще, чем на ПН «Шаболовка», что приводит и к более частому образованию приземной температурной инверсии по сравнению с центром города. Данный вывод подтверждает рис. 5, на котором представлены гистограммы распределения Q_S за период синхронных наблюдений на ПН «Тушино» и ПН «Шаболовка» с 13 по 30 июня 2006 г. (общая длительность наблюдений в каждом пункте составила 411 ч).

Согласно приведенным результатам на ПН «Шаболовка» отрицательные значения Q_S составляли примерно 25%, а на ПН «Тушино» – примерно 50%.

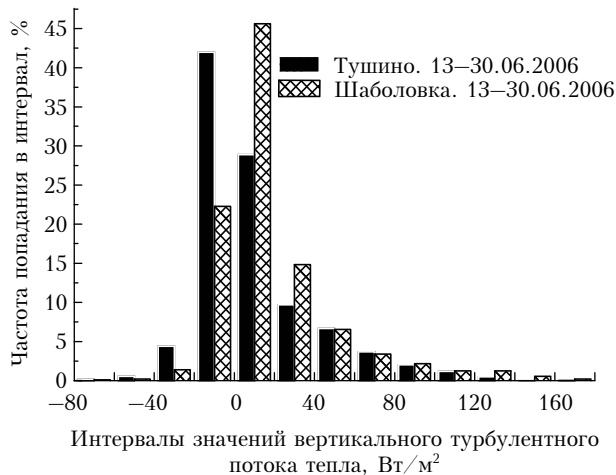


Рис. 5. Гистограммы распределения вертикального турбулентного потока тепла Q_S . Расчет частоты попадания производился для интервалов потока с шагом 20 Вт/м^2

Так как перераспределение тепла, влаги, аэрозоля и газов в «городском покрове» связано, в частности, с динамическими факторами, представляет интерес оценить корреляцию вертикального потока тепла Q_S , среднеквадратических отклонений вертикальной составляющей скорости ветра $\sigma_{w,S}$ и температуры $\sigma_{T,S}$ со скоростью ветра \bar{u} на разных уровнях.

Количественно связь вторых моментов и 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 выборок $X(t_i)$ и $Y(t_i)$ при нулевом значении аргумента τ (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 (выборки не центрировались); $-1 \leq K_y^x \leq 1$. Следует отметить, что для $\tau = 0$ значение КЛК не изменяется при любом порядке суммирования (при произвольной перестановке слагаемых ряда), что позволяет, в частности, использовать для расчетов КЛК предварительно отсортированные по какому-либо признаку ряды наблюдений (в том числе по времени). Важно только, чтобы при сортировке сохранялись произведения $X(t_i)Y(t_i)$.

Далее под функцией $X(t_i)$ понимаются осредненные за 10-минутный интервал времени значения скорости продольного ветра $\bar{u}(H, t_i)$ на разных высотах, а под функцией $Y(t_i)$ – значения Q_S , $\sigma_{T,S}$ или $\sigma_{w,S}$ для соответствующих моментов времени. Например,

для скорости ветра $\bar{u}(H)$ на какой-либо высоте H и потока тепла Q_S на высоте 5 м коэффициент линейной корреляции запишем как K_Q^u .

Анализ K_Q^u для разных высот показывает, что коррелированность \bar{u} и Q_S существенно зависит от изменчивости знака Q_S в выборке: чем больше в выборке значений Q_S одного знака, тем выше его корреляция со скоростями ветра на разных уровнях. В качестве примера приведем оценки K_Q^u для тех же эпизодов, которые рассматривались при анализе КЛК ветров на разных уровнях в первой части нашей статьи [1]. В частности, для ПН «Шаболовка» в период с 30.05 по 2.06.2006 г. (около 93 ч наблюдений) характерно некоторое преобладание положительных потоков Q_S (62% от общего времени наблюдения). При этом отрицательные потоки тепла были невелики (лишь в четверти случаев $Q_S \leq -20$ Вт/м²).

На рис. 6, а приведен график K_Q^u (линия с квадратами). Очевидно, что корреляции невысоки, особенно при сравнении Q_S с ветром на высотах более 140 м. Однако если рассчитать K_Q^u только для положительных (рис. 6, а, треугольники) или только для отрицатель-

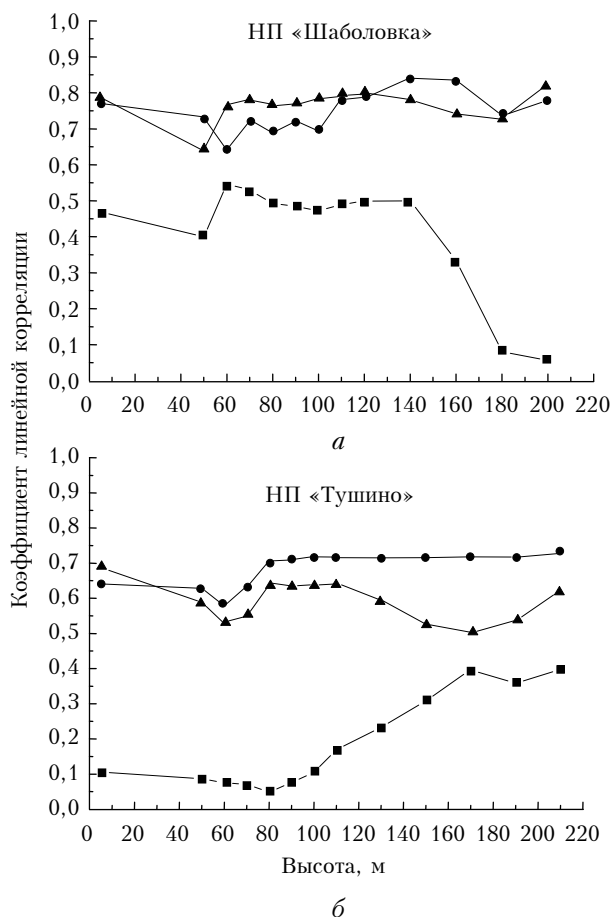


Рис. 6. Коэффициенты линейной корреляции вертикального турбулентного потока тепла Q_S на высоте 5 м и средней скорости продольного ветра \bar{u} на разных высотах: а – ПН «Шаболовка» (30.05–2.06.2006); б – ПН «Тушино» (24–30 сентября и 11–14 ноября 2007 г.). K_Q^u без разделения по типу стратификации (■), только для отрицательных Q_S (●) и только для положительных Q_S (▲)

ных (точки) значений Q_S , то его значения существенно возрастают в обоих случаях и для всех высот.

Закономерности КЛК, полученные по эпизодам 24–30 сентября и 11–14 ноября 2007 г. (суммарно около 182 ч наблюдений), были характерны и для ПН «Тушино» (рис. 6, б), где при учете в выборке Q_S всех значений потока Q_S какой-либо значимой корреляции говорить не приходится. Но ситуация меняется, когда анализ КЛК проводится только для положительных (44% времени наблюдения) или отрицательных (56% времени наблюдения) значений Q_S . В этих случаях корреляция возрастает до достаточно больших величин. Следует отметить, что на ПН «Тушино» коэффициент линейной корреляции K_Q^u на уровне 5 м имеет примерно такое же значение, как и на других высотах, вне зависимости от того, рассматриваются только «однознаковые» выборки Q_S или весь ряд наблюдений в целом.

Рассмотрим связь среднеквадратических отклонений температуры ($\sigma_{T,S}$) и вертикальной скорости ветра ($\sigma_{w,S}$) со скоростью продольного ветра \bar{u} на разных уровнях, вычисляя соответствующие коэффициенты линейной корреляции $K_{\sigma T}^u$ и $K_{\sigma w}^u$. Поскольку при оценках K_Q^u оказался важным знак вертикального турбулентного потока тепла на уровне 5 м, то анализ $K_{\sigma T}^u$ и $K_{\sigma w}^u$ также был проведен с разделением на «устойчивую» (отрицательные Q_S) и «неустойчивую» (положительные Q_S) стратификации.

Результаты расчетов показали, что на ПН «Тушино» зависимость $K_{\sigma T}^u$ от высоты остается примерно одинаковой при любых знаках Q_S (рис. 7, а).

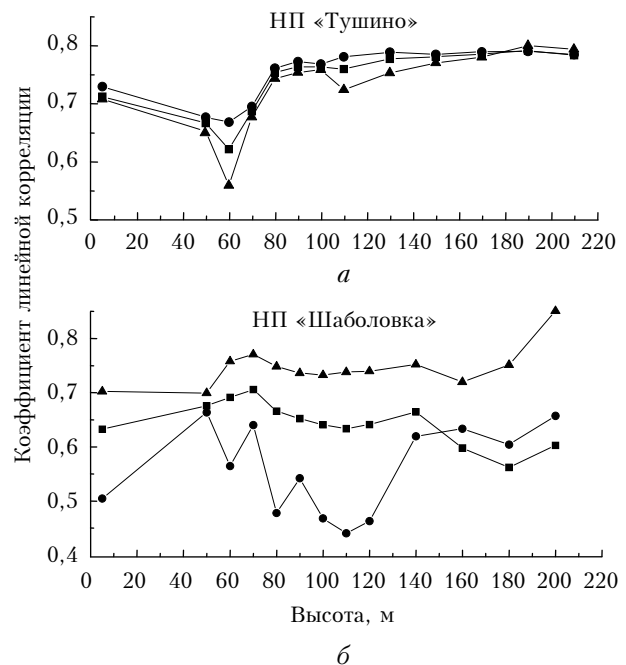


Рис. 7. Коэффициенты линейной корреляции стандартных отклонений температуры $\sigma_{T,S}$ на высоте 5 м и средней скорости ветра \bar{u} на разных высотах ($K_{\sigma T}^u$): а – ПН «Тушино» (24–30.09.2007 и 11–14.11.2007); б – ПН «Шаболовка» (30.05–2.06.2006). $K_{\sigma T}^u$ без разделения по типу стратификации (■), только для отрицательных Q_S (●) и только для положительных Q_S (▲)

Отметим минимум $K_{\sigma T}^u$ на высоте 60 м, что характерно и для коэффициента межуровневой корреляции скорости ветра в данном пункте наблюдения (см. в [1, рис. 5 и 6]). На ПН «Шаболовка» ситуация иная — имеется существенная зависимость $K_{\sigma T}^u$ от типа стратификации: при отрицательных значениях Q_S корреляция заметно меньше, чем при положительных (рис. 7, б). При этом характер зависимости $K_{\sigma T}^u$ от высоты различен для сравниваемых пунктов наблюдения. Причина этого пока не установлена.

Зависимость коэффициента линейной корреляции $K_{\sigma w}^u$ (связывающего среднеквадратическое отклонение вертикального ветра и среднюю скорость продольного ветра) от высоты без разделения обрабатываемых данных по условиям стратификации в целом подобна для обоих пунктов наблюдения, хотя степень корреляции несколько различается. Это демонстрирует рис. 8 (линии с квадратами). Сортировка данных по условиям стратификации на уровне 5 м и последующее вычисление значений $K_{\sigma w}^u$ приводят к выводу, что на ПН «Шаболовка» тип приземной стратификации слабо влияет на степень корреляции $\sigma_{w,S}$ с продольным ветром на вышележащих уровнях (рис. 8, б). Но применение подобной сортировки данных для ПН «Тушино» выявляет несколько иную закономерность: до высоты 90–100 м тип стратификации практически не влияет на $K_{\sigma w}^u$, но выше этого уровня корреляция при положительных значениях Q_S заметно уменьшается, в то время как при отрицательных Q_S корреляция несколько возрастает (рис. 8, а). Отметим также минимумы $K_{\sigma w}^u$ на высотах 50–60 м в обоих пунктах наблюдения

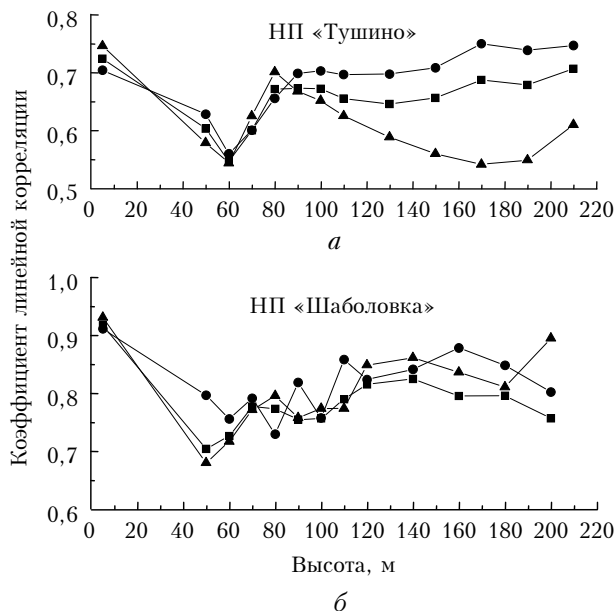


Рис. 8. Коэффициенты линейной корреляции стандартных отклонений вертикальной составляющей скорости ветра $\sigma_{w,S}$ на высоте 5 м и средней скорости ветра \bar{w} на разных высотах ($K_{\sigma w}^u$): а — ПН «Тушино» (24–30.09.2007 и 11–14.11.2007); б — ПН «Шаболовка» (30.05–2.06.2006). $K_{\sigma w}^u$ без разделения по типу стратификации (■), только для отрицательных Q_S (●) и только для положительных Q_S (▲)

и высокую степень корреляции между скоростью продольного ветра и стандартным отклонением вертикального ветра на уровне 5 м на ПН «Шаболовка».

Заключение

Сравнение результатов, полученных на двух разнесенных постах наблюдений, показывает, что в пределах городской черты Москвы могут существовать различные вертикальные распределения температуры воздуха. В частности, на ПН «Тушино» присутствие *приземных* инверсий температуры является достаточно частым событием даже в теплое время года. Это отличает его от пунктов наблюдений в центральной части урбанизированной территории, где устойчивая стратификация в городском подслое шероховатости реализуется редко.

Полученные результаты показывают, что для рассматривавшегося периода наблюдений на ПН «Тушино» влияние типа стратификации на корреляционные связи скорости ветра и приземных значений потока тепла происходит в основном через изменение «статистики» вертикальной составляющей ветра, поскольку «статистика» температуры остается в этом пункте наблюдений неизменной при любой стратификации. На ПН «Шаболовка» наблюдается обратная закономерность: тип стратификации влияет на корреляции скорости ветра и приземного теплового потока только через изменение «статистики» температуры.

Установленные закономерности требуют дополнительных исследований с использованием большего статистического объема экспериментального материала. Перспективность этих исследований определяется потенциальной возможностью связать характеристики ветра над городом (на уровнях выше приземного слоя атмосферы, где доступен прогноз ветра с хорошей оправданностью) с характеристиками процессов в «городском покрове», что позволяет дополнить существующие методики прогноза распределения газо-аerosольных выбросов в атмосфере над урбанизированной территорией важными предикторами.

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. контракты № 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204) и Проекта № 4.1 Президиума РАН.

1. Гладких В.А., Макиенко А.Э., Миллер Е.А., Одинцов С.Л. Исследование параметров пограничного слоя атмосферы в городских условиях с помощью средств локальной и дистанционной диагностики. Часть 1. Межуровневые корреляции скорости ветра // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 978–986.
2. 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.
3. Rotach M.W. Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon // Atmos. Environ. 1995. V. 29, N 13. P. 1773–1486.
4. Gryning S.-E., Batchvarova E., Brummer B., Jorgensen H., Larsen S. On the extension of the wind profile

- over homogeneous terrain beyond the surface boundary layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2007. V. 124, N 2. P. 251–268.
5. Mestayer P.G., Durand P., Augustin P., Bastin S., Bonnefond J.-M., Bénéch B., Campistron B., Coppalle A., Delbarre H., Dousset 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., Puiggrenier 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.
 6. 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.
 7. 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.
 8. Горчаков Г.И., Гладких В.А., Глядко П.С., Макиенко А.Э., Одинцов С.Л., Озерецкий 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.
 9. 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.
 10. Гладких В.А., Макиенко А.Э., Одинцов 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.*

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 2. The air temperature and heat flow.

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 frequency of occurrence and the heights of temperature inversion boundaries under the conditions of woodland-park zone are analyzed. The obtained results are compared with analogous estimates of some other authors for central part of the city. It is found that a stable stratification of the urban roughness sub-layer takes place considerably more often in the woodland-park zone of the city than in the central part of the urbanized territory.