

УДК 551.50:551.524.3

## Оценка пространственных неоднородностей температурной стратификации в пограничном слое Московского мегаполиса по данным дистанционных измерений

В.П. Юшков\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Поступила в редакцию 20.08.2015 г.

Анализируются результаты совместного эксперимента по измерению и восстановлению профилей температуры в пограничном слое атмосферы в трех точках Московского мегаполиса. Эти измерения дали возможность оценить пространственную изменчивость характеристик термической стратификации в пределах мегаполиса. Показано, что локальные особенности точек наблюдения оказывают влияние на ошибки восстановления температуры на всех высотах. Снизить эту зависимость позволяют измерения градиентов температуры. Сопоставление градиентов температуры показало постепенное уменьшение влияния локальных особенностей точек измерений в диапазоне от 100 до 300 м. На основе анализа статистической изменчивости вертикальных градиентов предложена согласованная система «опорных уровней» температурных профилей данного типа.

*Ключевые слова:* температура, пограничный слой, дистанционное зондирование, мегаполис, изменчивость; temperature, boundary layer, remote sensing, megalopolis, variability.

### Введение

Методы дистанционного зондирования и восстановления, на основе дистанционных измерений, характеристик атмосферы и океана в последние десятилетия находят все больше практических применений [1–3]. Метеорологический температурный профилемер МТР-5 [4] является одним из таких приборов дистанционного зондирования. Ключевым преимуществом дистанционных измерений профилей температуры с поверхности являются малая стоимость поддержания инфраструктуры измерений в сравнении, например, с созданием высотных метеорологических мачт, а также возможность получать данные измерений непрерывно, с небольшим интервалом дискретизации (5 мин). Для изучения температурных неоднородностей воздушного бассейна мегаполиса приборы такого типа представляют разумный компромисс при выборе между точностью измерений и «стоимостью» исследования.

Хотя дистанционные средства зондирования восстанавливают измеряемые характеристики в терминах, привычных для метеоролога, пространственная и временная изменчивость этих характеристик (в том числе случайная) в атмосферном пограничном слое (АПС) существенно отличается от наблюдаемой традиционными контактными методами. Значительно отличаются и корреляционные свойства ошибок измерений, поскольку восстановление

вертикального профиля температуры происходит по совокупности связанных угловых измерений. Сопоставление дистанционных СВЧ-измерений профилей температуры с измерением турбулентных пульсаций в АПС показывает, что сама методика угловых дистанционных измерений обладает фильтрующими свойствами как по временной, так и по пространственной шкалам. Но если для стандартных метеорологических изменений температуры, скорости ветра, давления, влажности методика измерений строго регламентирована, то для новых приборов создание такой методики требует длительных исследований. Принцип работы температурного профилемера МТР-5 предполагает горизонтальную однородность слоев атмосферы при расчетах вертикальных профилей, требует специального (приподнятого над поверхностью) места для установки, использует коррекцию уровня шумов радиометра по дополнительным контактными измерениям внешним датчиком температуры и т.п. Другими словами, использование на практике современных высокотехнологичных средств измерений требует знания «технологической модели» измерений для того, чтобы выводы научных исследований, использующих такие приборы, были адекватны.

При измерении вертикальных профилей температуры и изучении различий термической стратификации одним из ключевых параметров является точность измерения вертикальных градиентов температуры  $T_z$ . Однако формальное предположение о независимости (некоррелированности) ошибок восстановления температуры на разных высот-

\* Владислав Пролетарьевич Юшков (yushkov@phys.msu.ru).

ных уровнях дало бы оценку точности измерения градиентов  $T_z \geq 1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ . Такое значение, как известно, соответствует разнице между неустойчивой сухоадиабатической и устойчивой изотермической стратификацией. Для анализа пространственной неоднородности термической стратификации в масштабах мегаполиса такая ошибка не может считаться приемлемой. Иначе говоря, «паспортные» ошибки восстановления профилей температуры не являются независимыми и некоррелированными.

Многолетний опыт работы с температурными профиломерами МТР-5 показывает, что ошибки дистанционных измерений следует разделять на систематические (постоянные или медленно меняющиеся); периодические и связанные с термической стратификацией, например с высотой инверсионного слоя; неоднородные по пространству (локальные), связанные с расположением контрольного датчика температуры; и, наконец, собственно случайные (некоррелированные). Настоящая статья посвящена анализу этих ошибок восстановления профилей температуры с помощью температурного профиломера МТР-5 в неоднородной городской среде. Разделение ошибок при сопоставлении измерений позволяет существенно улучшить точность оценки температурной стратификации АПС и определяет перспективы использования этого метода измерений [5].

Сетевые измерения с помощью температурного профиломера МТР-5 в пределах Московского мегаполиса проводятся не впервые [6–8]. Однако детальный анализ ошибок измерений в этих работах не проводился. Измерения рассматривались «как данные» (as is). В то же время при близких сетевых наблюдениях в пределах, преимущественно, одной воздушной массы ошибки измерений могут оказать ключевое влияние на выводы исследования. В особенности, если эти ошибки являются систематическими, связаны с суточным ходом или обусловлены локальными особенностями расположения прибора.

Если считать первым шагом исследований статистический анализ различий профилей температуры в городской и загородной местностях, выполненный в упомянутых работах, то анализ причин этих различий — необходимый следующий шаг. Можно ли связать всю разницу измерений в двух точках с «городской аномалией» («островом тепла»)? Остается ли эта аномалия постоянной в разных точках городской среды? Какова ошибка определения разницы температур на разных высотах? Эти и подобные вопросы с необходимостью возникают при продолжении таких исследований.

## 1. Инструменты измерений и выбор точек наблюдений

Принцип действия сканирующего температурного профиломера МТР-5 основан на приеме собственного излучения молекулярного кислорода атмосферы в спин-вращательной полосе на длине волны около 5 мм [9–11]. Интенсивность этого излучения зависит от температуры атмосферы, а прием излу-

чения под разными углами и предположение о горизонтальной однородности атмосферных слоев с различной температурой позволяют восстанавливать «эффективный» профиль температуры, который бы давал наблюдаемое изменение радиояркости температуры при изменении угла приема. При зондировании пограничного слоя атмосферы задача обратного восстановления профиля температуры является почти линейной [12]. Температурные СВЧ-радиометры очень надежны и получают все большее распространение в практических измерениях и системах непрерывного мониторинга [13].

Сравнение с традиционными контактными измерениями на мачтах и с помощью радиозондов [14–16] показывает, что СВЧ-профиломеры во многих ситуациях правильно восстанавливают вертикальные профили температуры, а разница между измерениями дистанционным и контактными способами составляет около  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , причем часть этой разницы обусловлена ошибками традиционных измерений, которые принимаются за «эталонные», и разным пространственно-временным масштабом осреднения по области измерений. Детальное сопоставление данных непрерывных контактных и дистанционных методов измерений и учет инструментальных ошибок позволяют отделить систематическую и случайную ошибку и в нижней части АПС добиться точности восстановления температуры менее чем  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  [17].

В настоящей статье сравниваются измерения, проводимые с помощью новой, улучшенной, версии прибора МТР-5 с большей предельной высотой зондирования (до 1000 м) [18]. Использование усовершенствованной модификации прибора не только преследует цель определить его предельные возможности, но и позволяет выявить недостатки длительных непрерывных измерений, проводящихся с помощью приборов «предыдущего поколения» уже достаточно длительное время [19]. Поскольку принципы измерения и восстановления температуры в приборах обоих поколений во многом тождественны, выводы, сделанные нами, справедливы не только для данного конкретного прибора, но и для дистанционного зондирования такого типа в целом.

Точки наблюдений были выбраны так, чтобы эти выводы можно было использовать и для анализа накопившихся данных длительного непрерывного мониторинга, проводящегося уже более 10 лет. Основная точка измерений была расположена в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) Росгидромета, в ближней загородной (suburban) зоне. Измерения в этой точке (с координатами  $55^\circ 55' 30,43'' \text{ с.ш.}$ ,  $37^\circ 31' 24,26'' \text{ в.д.}$ , на высоте 20 м от поверхности) наиболее репрезентативны, поскольку проводятся уже многие годы при участии разработчиков прибора и контролируются запуском аэрозондов в непосредственной близости от точки измерений. Измерения во второй точке, на юго-западе Москвы, на физическом факультете МГУ ( $55^\circ 42' 00,28'' \text{ с.ш.}$ ,  $37^\circ 31' 45,30'' \text{ в.д.}$ , высота установки над поверхностью 40 м), проводятся совместно с дистанционными измерениями профилей скорости ветра с помощью акустического локатора [20]. Профили скорости

ветра и эхограммы дистанционного зондирования надежно фиксируют состояние турбулентного перемешивания пограничного слоя [21]. В свою очередь, интенсивность турбулентного перемешивания в АПС определяет турбулентные потоки тепла, а значит, и скорость изменения температуры с высотой [22].

Третья точка измерений предоставлена ФГУП «Мосэкомониторинг» и расположена на востоке Москвы в районе Косино ( $55^{\circ}43'3,09''$  с.ш.,  $37^{\circ}56'13,20''$  в.д., высота над поверхностью 4 м). Эти измерения также проводятся уже достаточно длительное время, имеют важное экологическое значение, а сопоставление разницы между измерениями в трех точках дает информацию о пространственной (по горизонтали) изменчивости поля температуры в городском АПС.

## **2. Общие характеристики изменчивости поля температуры за период наблюдений и влияние уровня (высоты) установки профилера**

На рис. 1, *a* показан ход температуры на уровне 0 – уровне установки прибора в двух точках измерений. Хорошо видно, что синоптический процесс за время проведения сравнения не был стационарным. Четко выделяются суточный ход температуры и стохастическая компонента как синоптического, так и внутрисуточного масштабов.

Статистический спектральный и корреляционный анализ, как известно, не имеет смысла применять к нестационарным процессам [23]. Сама методика выделения стационарной случайной компоненты может быть различной. В настоящем исследовании в качестве первого шага выбрана простейшая, общепринятая (см. [3–6]), но не учитывающая динамики и пространственной неоднородности синоптических процессов: анализировались лишь одновременные разницы температур в различных точках. Такой подход позволяет легко исключить общую для всех точек измерений синоптическую изменчивость, но не учитывает пространственной динамики, например направления и скорости ветра, т.е. включает пространственную синоптическую изменчивость в число случайных неконтролируемых факторов. Более аккуратный подход должен учитывать особенности синоптического состояния и, возможно, использовать модельную оценку пространственной неоднородности динамических процессов.

Одновременная разница температур в этих точках наблюдений (ЦАО и МГУ) показана на рис. 1, *b* для трех высот: 0, 100 и 1000 м. Видно, что разницу температур уже можно приближенно считать случайным стационарным процессом, содержащим, однако, как показал спектральный анализ, периодическую (суточную) компоненту. Но амплитуда этой периодической компоненты также является случайной функцией. Такая совокупность делает анализ пространственных различий достаточно сложной статистической задачей, поскольку амплитуда суточного хода разницы температур в пределах

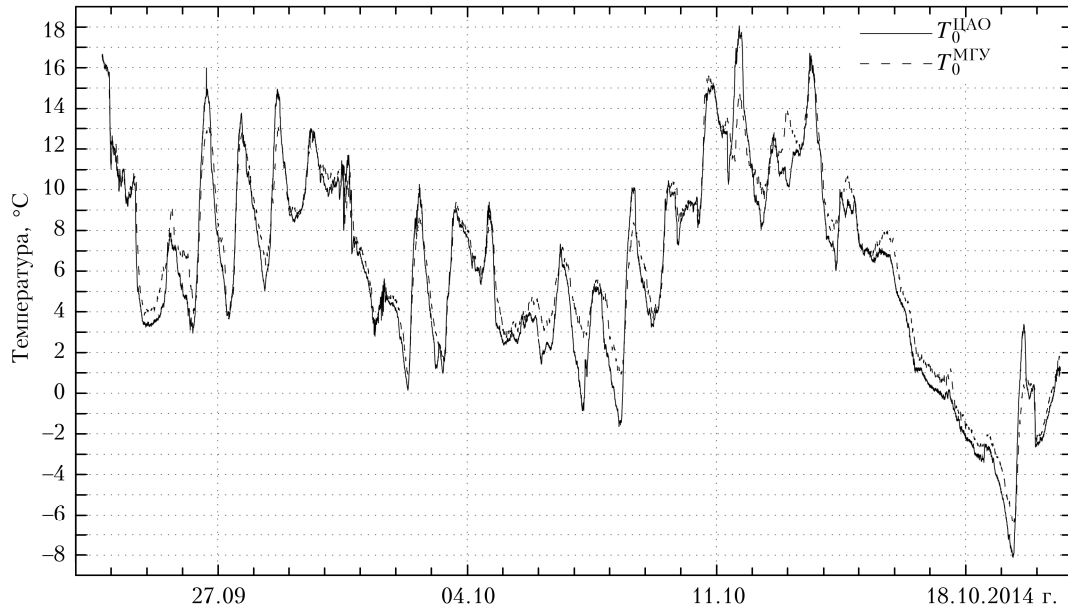
периода измерений не является стационарной и, например, может обладать случайным нелинейным трендом.

Совокупность сезонности, синоптической изменчивости, пространственной неоднородности, суточных колебаний радиационных потоков и стохастической изменчивости, связанной с гидрометеорологическими условиями (облачностью и осадками), делают вопрос об измерении влияния городской среды на изменение состояния АПС более сложным, чем формальная отсылка к влиянию городского «острова тепла».

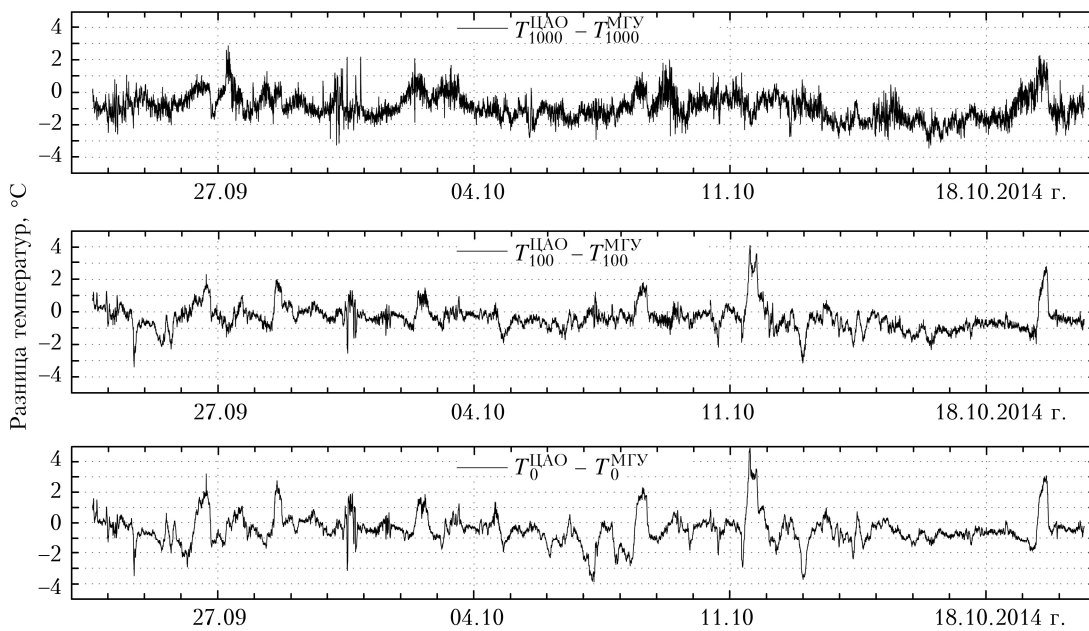
Из многочисленных измерений вертикальных профилей температуры над ровной поверхностью следует, что в приземном слое, который характеризуется постоянным турбулентным потоком тепла и импульса, профиль температуры будет иметь логарифмическую особенность [22]. Этот небольшой ( $\leq 10\%$  по высоте) участок АПС можно считать приповерхностным температурным скачком, поскольку наиболее сильное изменение температуры наблюдается непосредственно у поверхности.

Наличие такого скачка делает вопрос о «нулевом» уровне температуры при сравнении данных разных температурных профилеров весьма существенным. Во-первых, СВЧ-антенна температурного профилера собирает излучение из измерительного объема, высоту которого можно оценить по масштабу поглощения (скин-слоя) принимаемого излучения ( $\sim 0,5$  км) и характеристике диаграммы направленности антенны ( $\sim 3^{\circ}$ ), т.е. составляет десятки метров. Во-вторых, профилеры МТР-5 для коррекции калибровки СВЧ-радиометра, являющегося «сердцем» прибора, используют внешний датчик температуры с пространственным размером области измерения около 10 см. От его положения в разных точках измерений существенным образом зависит как разница ошибок восстановления температуры, так и суточная динамика этой разницы. Другими словами, при сравнении восстановленных температур в разных точках городской среды важнейшим фактором является учет вертикальной привязки профилей и локальных особенностей точек дистанционных измерений.

В будущем, при использовании температурных профилеров на оперативной сети станций, можно рекомендовать одинаковое размещение таких приборов в соответствии с методическими рекомендациями. Возможным вариантом представляется их размещение на метеорологических мачтах или, например, мачтах сотовой связи, на регламентированной высоте примерно 50 м. Достаточно высокое расположение нулевого уровня позволит не учитывать локальные особенности турбулентного перемешивания, обеспечит хорошую вентиляцию внешнего контрольного датчика, а также позволит объединить дистанционные измерения с контактными градиентными, которые активно развиваются в последние десятилетия, надежны и позволяют контролировать состояние турбулентного перемешивания в самой нижней части АПС в сопоставлении с данными дистанционных измерений термической стратификации.



*a*



*б*

Рис. 1. Временной ход температуры на уровне установки профилера (по радиоярким измерениям «в горизонт») в ЦАО и МГУ за время проведения совместных измерений (*a*) и разницы температур (*б*), восстановленных на трех уровнях: 0, 100 и 1000 м

Рис. 1, *б* также показывает значительную высокочастотную компоненту разницы температур на больших высотах, которую следует отнести либо к «шумам» прибора или алгоритма восстановления профилей температуры, либо к мезомасштабной турбулентной изменчивости температуры на этой высоте. Ниже будет показано, что гипотеза об ошибках процедуры восстановления имеет больше оснований.

### 3. Вертикальные градиенты температуры и их пространственные различия

Для измерения локальных особенностей и пространственной разницы температур в нескольких точках городской среды вблизи поверхности не обязательно применять СВЧ-профилирование. Хорошим

примером традиционного подхода к изучению городского «острова тепла» в мегаполисе является использование густой сети автоматических метеорологических станций в Токио [24]. Ключевым преимуществом температурных СВЧ-профилемеров является возможность измерять термическую стратификацию на высотах, недоступных контактными градиентным методам, причем с временным и пространственным (по горизонтали) шагом, значительно меньшим, чем на сети аэрологических измерений.

При интенсивном и рутинном (непрерывном) использовании температурных профилемеров на сети локальных наблюдений возникает вопрос о точности и проверке таких измерений. Стандартными и наиболее часто используемыми критериями ошибок измерений являются средние уклонения (bias) и среднеквадратичная ошибка (rms) (см., например, [14, 16]). Для профилемера МТР-5 такие ошибки были рассчитаны в работе [18]. Следует понимать, однако, что настройка любого прибора дистанционного зондирования имеет свои «технологические параметры» и они специально подбираются для уменьшения этих основных характеристик ошибок. Но даже если «средняя» ошибка близка к нулю, этого нельзя сказать про временной, например суточный, ход ошибки. В значительной степени среднеквадратическое отклонение характеризует вариации ошибок, однако из этой оценки невозможно установить корреляцию ошибок по вертикали, зависимость от стратификации АПС или скорости ветра. Иначе говоря, более детальный статистический анализ ошибок измерений позволяет получить больше информации и о возможных причинах различий в сетевых измерениях в городской и загородной местности.

То, что температурные СВЧ-профилемеры в значительной степени правильно восстанавливают градиенты температуры, подтверждается многочисленными сопоставлениями с контактными измерениями. При таком сопоставлении, однако, уровень ошибок восстановления градиентов остается заметным [16]. Особенно значительными будут ошибки восстановления градиентов температуры при устойчивой стратификации [17, 25]. В значительной мере эти ошибки обусловлены и различным пространственным и вертикальным разрешением традиционных контактных и дистанционных методов измерений.

Рис. 1, б демонстрирует важную особенность радиоярких дистанционных измерений: разница температур на больших высотах не стремится к нулю. Для анализа этого феномена были сопоставлены вертикальные градиенты температуры в двух пространственно разнесенных точках на больших высотах, т.е. вне области влияния локальных особенностей. На рис. 2, а показан одновременный ход вертикального градиента температуры  $T_z$  на высоте 1000 м (по значениям, восстановленным на высотах 1000 и 950 м) в двух точках измерений. Для фильтрации «инструментального» высокочастотного шума использовалось 30-минутное окно Ханна (косинусное окно). Важным результатом, который показывает рис. 2, а, является синхронное измене-

ние вертикального градиента в двух достаточно разнесенных точках (на расстоянии около 25 км).

Такая синхронность заставляет предположить, что воздух на высотах около 1000 м является «хорошо перемешанным», не имеет локальных особенностей, а средняя за 30–60 мин температура в точке измерений одинакова, исходя из переноса неоднородностей температуры средним потоком. Сопоставление с рис. 1, б позволяет предположить, что разница температур на этих высотах обусловлена скорее процедурой восстановления и локальными особенностями приземной температуры в точках наблюдений, относительно которой рассчитывается изменение радиояркой температуры, измеряемой профилемером. Проведенное сопоставление хотя и не позволяет заключить, насколько правильно профилемер восстанавливает градиенты температуры, но сама синхронность изменений показывает достаточную чувствительность профилемера к временным изменениям градиента температуры в верхней части АПС.

Сопоставление градиентов температуры на самом нижнем уровне (рис. 2, б) по разнице температур на уровнях 50 и 0 м показывает закономерно роль суточного цикла устойчивости АПС. Как хорошо известно по градиентным изменениям и по опыту ранее проведенных сравнений в Московском регионе [6], в загородной местности в ночные часы термическая устойчивость в нижней части АПС больше. Но на эту общую закономерность накладывается еще и большая высота установки профилемера МТР-5 в точке наблюдений в МГУ, а также большая динамическая шероховатость приземного слоя над территорией МГУ (с высокими зданиями и широкими проспектами), что приводит к большей динамической скорости и к большему коэффициенту турбулентного обмена. Кроме того, точка измерений в МГУ приподнята над средним уровнем Москвы: высота Воробьевых гор — части Теплостанской возвышенности, над уровнем Москвы-реки составляет около 70 м. Если приблизительно учесть разницу высот расположения профилемеров относительно горизонтального потока, натекающего на город, в 50 м, то вертикальные градиенты в МГУ на высоте 75 м (разница температур между уровнями 100 и 50 м) и в ЦАО на высоте 125 м ( $T_{150} - T_{100}$ ) в значительной степени уже выравниваются по амплитуде.

В диапазоне высот от 100 до 300 м наблюдаются постепенное уменьшение разницы температурных градиентов в утренние и дневные часы в разных точках и близость общего суточного хода выше 300 м в масштабе чувствительности профилемера. На высоте 300 м прослеживается в основном общий суточный ход температурной стратификации и небольшие локальные особенности точек измерения. Изменение температурных градиентов происходит в значительной степени синхронно, что связано с общим суточным ходом прогрева и остывания АПС, а также ветровым перемешиванием. Локальные различия градиентов температуры на высоте около 300 м уже значительно меньше синхронной

синоптической изменчивости стратификации как внутрисуточного, так и межсуточного синоптического масштабов. Впервые эта закономерность была отмечена в работе [26].

Две точки измерений в границах Московского мегаполиса позволили проверить, насколько могут быть велики различия в пределах городской среды. Сопоставление вертикальных градиентов температуры в МГУ и Косино (рис. 3) показывает, что амплитуды вариаций имеют тот же масштаб, что и при

сравнении измерений в городской и «загородной» местностях. Причем, если по измерениям в ЦАО хорошо заметен прогрев приземного слоя в дневные часы, то по измерениям в Косино становится понятной роль более низкого расположения профилимера: в ночные часы при устойчивой стратификации именно тонкий приземный слой приводит к столь большому положительному градиенту температуры. Ниже еще будут показаны статистические характеристики этих различий.

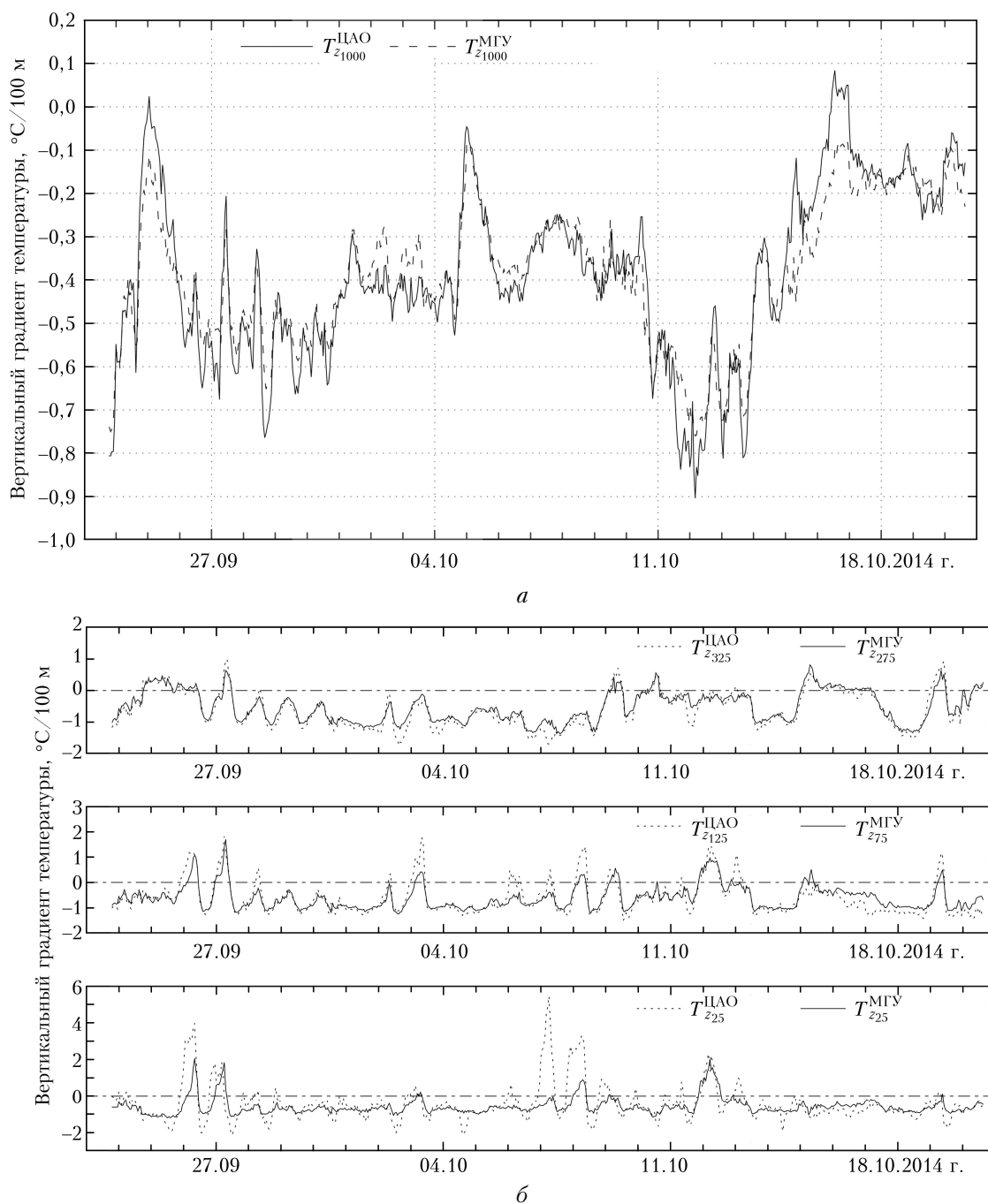


Рис. 2. Разница градиентов температуры в верхней части АПС (а) по измерениям в тех же точках (хорошо видна синхронность вариаций) и различия градиентов в нижней части АПС (б) на самом нижнем уровне (внизу), на «сдвинутых» уровнях 125 и 75 м и, аналогично, на уровнях 275 и 325 м (вверху)

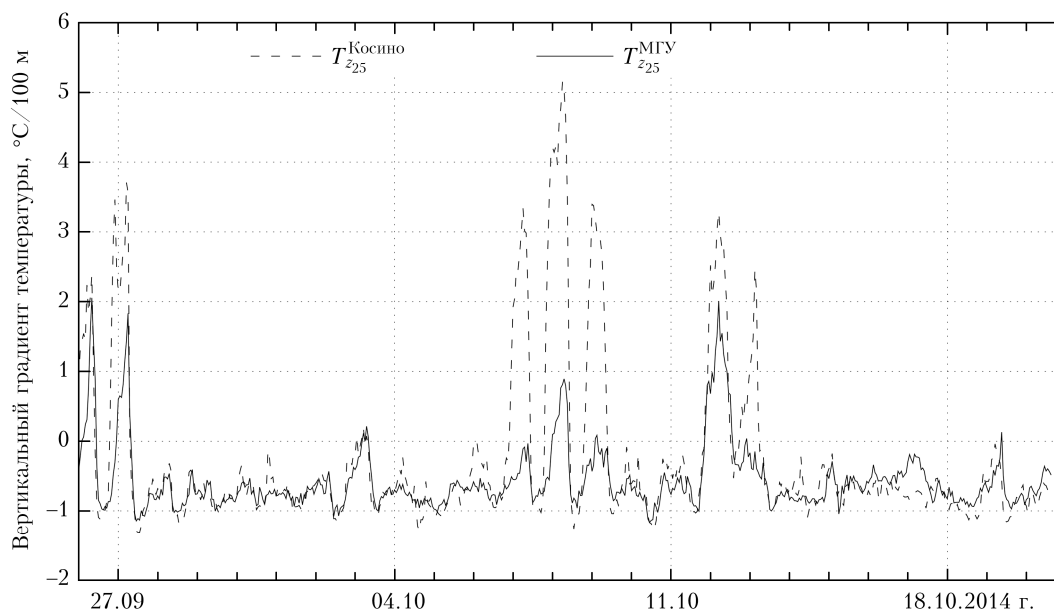


Рис. 3. Сопоставление градиентов температуры по измерениям в двух точках городской среды. Положительные значения соответствуют приземной инверсии температуры

Следует отметить, что в отличие от европейских или американских городов Московский мегаполис не имеет «пригорода» (suburban) в таком понимании. Вокруг Москвы крупные лесные массивы чередуются с многоэтажной застройкой и промышленными зонами. В этом смысле район Косино не сильно отличается от района измерений в ЦАО (г. Долгопрудный).

#### 4. Пространственная изменчивость температуры и высотное разрешение температурных профиломеров

Сопоставление точности восстановления температуры в АПС по данным углового сканирования разными приборами и в разных точках зондирования, анализ неконтролируемых ошибок измерений подсказывают, что вертикальное «разрешение» профиломера МТР-5 падает с ростом высоты. Наблюдения с помощью других средств измерений: привязных аэростатов, аэрологического зондирования высокого пространственного разрешения, акустического зондирования, позволяющего оценивать интенсивность мелкомасштабных температурных флуктуаций, показывают, что в АПС достаточно часто наблюдаются слои, характеристики которых быстро меняются по вертикали [27, 28]. СВЧ-профиломеры не способны восстанавливать «высокие» инверсии [16], но хорошо «разрешают» приземные и приподнятые инверсии в ночные и утренние часы в средней полосе и в полярных регионах [18, 29]. Способность восстанавливать быстрые изменения температуры по вертикали можно оценить по частоте их встречаемости в профилях: невозможность разрешения приводит к их отсутствию или уменьшению повторяемости. На рис. 4 показано высотное распределение среднеквадратических

вариаций вертикальных градиентов температуры от  $\sigma_{T_z}(z)$  в трех точках зондирования за время эксперимента.

Считая, что среднеквадратическая ошибка восстановления температуры  $\delta_T$  слабо зависит от высоты и является приблизительно постоянной ( $\leq 1^\circ\text{C}$ ) [18], отношение  $\delta_T/\sigma_{T_z}$  показывает, каким следует выбирать шаг разрешения температурного профиломера по вертикали, чтобы он был согласован с ошибкой восстановления при различной стратификации АПС, т.е. в регулярных наблюдениях. Уменьшение дисперсии вертикальных градиентов не является следствием только процедуры восстановления, а характеризует статистическую повторяемость разных типов стратификации на разной высоте, и эта информация может быть использована (и используется) для улучшения точности восстановления градиентов температуры на более низких уровнях с помощью процедуры статистической регуляризации [11, 30]. Такая статистическая регуляризация косвенно приводит и к уменьшению пространственного разрешения температурных профиломеров на более высоких уровнях.

Чтобы уровни восстановления температуры оставались постоянными, их можно регламентировать, исходя из некоторого «среднего» уменьшения дисперсии вертикальных градиентов. Такими уровнями могут служить высоты: 800, 400, 200, 100, 50 и 25 м. Само число уровней определяется по максимальной степени полинома, который можно провести через все точки измерений без потери точности.

Последний уровень примерно соответствует вертикальному пространственному усреднению при «горизонтальном» зондировании. Ошибка восстановления температуры на этом уровне может быть проверена в сопутствующих «эталонных» контактных измерениях или оценена по измерениям внешним датчиком.

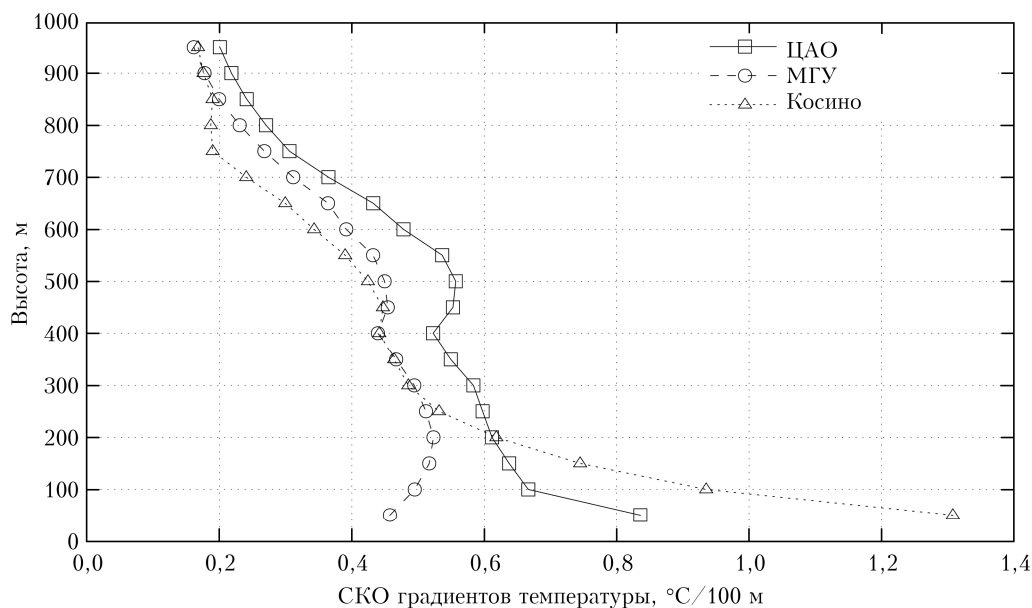


Рис. 4. Статистическая изменчивость градиентов температуры на разных высотах по измерениям в трех точках

## 5. «Пятнистость» городской среды, модели «острова тепла» и распределения разницы температур в двух точках

Сопоставление измерений в городской среде и загородной местности обычно связывают с влиянием городского «острова тепла» (UHI) [5–8]. Однако точный количественный анализ влияния городского мегаполиса на пограничный слой имеет смысл, если разница измеряемых характеристик значительно больше неопределенности, складывающейся из пространственной изменчивости и ошибок измерений. Изучение влияния городской среды на приземную температуру и адвекцию воздушных течений проводится уже много лет [31–33] и показывает, что это предположение далеко от реальности.

Во-первых, детальные измерения в других мегаполисах и не очень крупных городах [34–36] подтверждают, что «остров тепла» не однороден, а имеет пятнистую структуру, связанную с орографией, разной плотностью городской застройки, гидрологией города (береговая линия, реки и озера, парки и внутренние водоемы и т.п.). Пространственная «случайность» в такой среде имеет особый смысл: она не исчезает при усреднении многих измерений по времени, поскольку такое случайное поле не является формально однородным и изотропным. Иначе говоря, обнаруженные в двух точках различия могут быть обусловлены не только «островом тепла», но и локальными особенностями точек измерений.

Чтобы отделить «случайные» отклонения от выводов, которые имеют общий характер, необходимо использовать модель изучаемой системы. Даже если эта модель не будет точной, она покажет, какого масштаба неоднородности можно ожидать при сопоставлении измерений в разных точках, на разных высотах, при разной стратификации и раз-

ном направлении ветра. Однако модели городского «острова тепла» совсем не являются простыми и самоочевидными. Математические проблемы такого моделирования становятся ясными при сопоставлении трех равноиспользуемых концепций [33]:

- энергобалансовой, когда городская среда описывается однородным слоем, для которого формально записывается общий баланс тепла и влаги (slab models);

- теории пограничного слоя, когда за выделенное направление принимается направление среднего ветра. Этот подход опирается на теорию подобия Монина–Обухова, предложенную исходно для потока над ровной шероховатой поверхностью. Примером таких исследований является работа [37];
- собственно теория «острова», т.е. точечной особенности, для которой ключевым является параметр расстояния от центра. Такая существенно трехмерная постановка задачи резко ограничивает возможность использования как теории подобия, так и представления об однородности городской среды.

При анализе результатов измерений эти модельные представления подсказывают, что одним из параметров подобия становится пространственный масштаб городского «острова тепла». Скорость и направление ветра также могут влиять на различия температурной стратификации в пределах мегаполиса. Детальное численное моделирование также может быть более полезным, чем простое деление точек наблюдений на городские (urban), пригородные (suburban) и «загородные» точки (rural) в окружающем ландшафте [6]. Кроме того, Москва, как и любой другой крупный мегаполис, не имеет резкой границы, и его «пригороды» и пригородные леса, парки, водохранилища, промышленные зоны имеют сложное чередование (patterns). Поэтому, возможно, статистический подход к полученным данным наблюдений предпочтительнее, чем модельный или детерминированный, поскольку при



разных синоптических ситуациях различия между городом и загородной территорией будут существенно отличаться.

Статистически обобщить наблюдаемые закономерности позволяет построение эмпирических распределений. Накопленная плотность вероятности или эмпирическая функция распределения наглядно показывает, например, суточный ход средней разни-

цы температур (по медиане распределения), а также повторяемость значительных отклонений (по квантилям распределения). Такие распределения были построены для всех высот и попарных комбинаций точек, а также для градиентов температуры. На рис. 5 для примера показаны два эмпирических распределения разницы температур: МГУ–Косино и ЦАО–Косино, и их зависимость от времени суток.

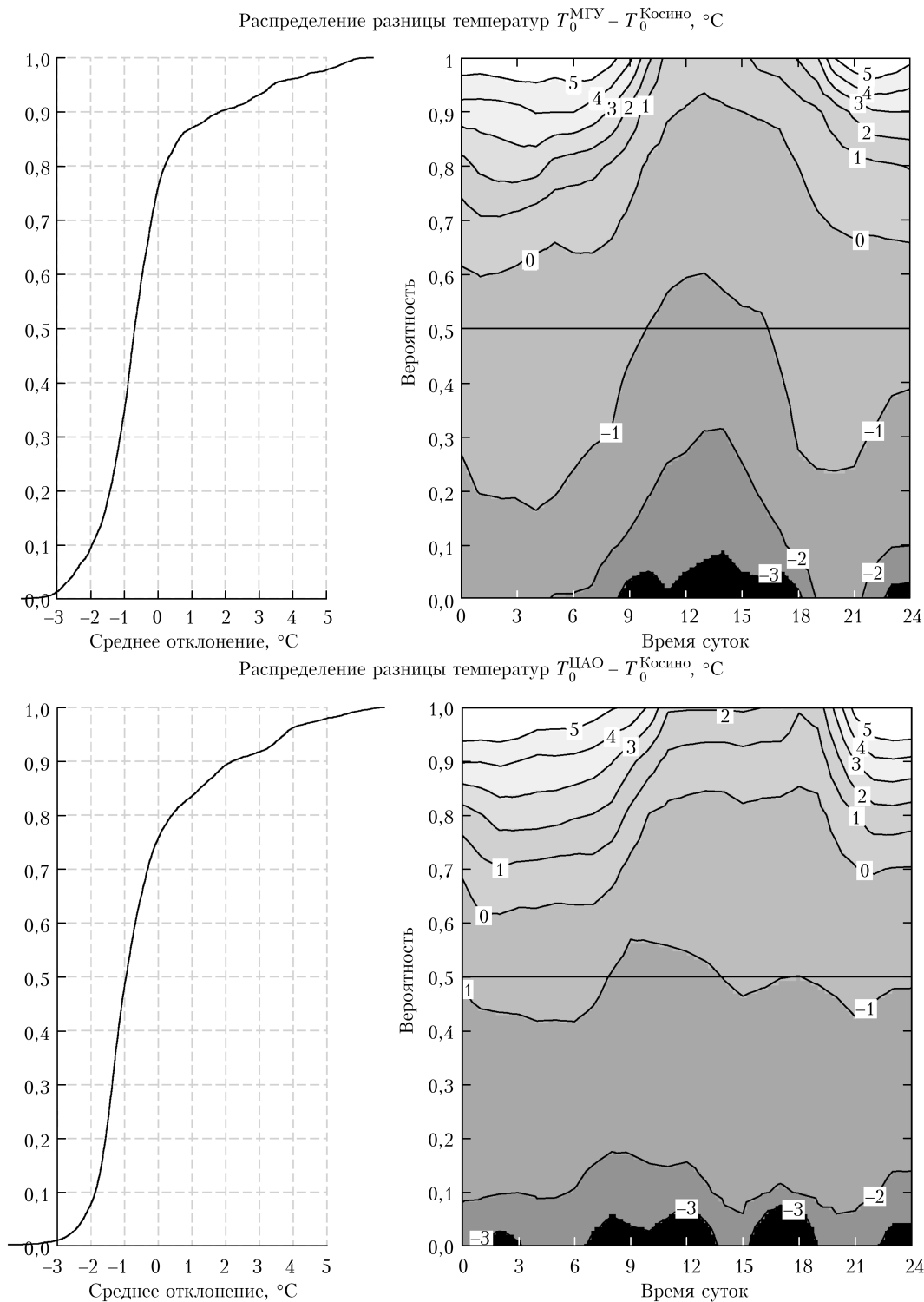


Рис. 5. Эмпирические функции распределения разницы температур по измерениям в двух точках наблюдений и их суточный ход (показан справа)

Сопоставление этих двух пар точек показывает, что разница температур между разными точками городской среды имеет тот же порядок, что и разница температур между городом и пригородом. Причем в первом случае суточный ход этой разницы выделяется значительно лучше, чем во втором, что, несомненно, связано с большей разницей высот точек измерений. При сравнении температур в городской и загородной точках, в среднем, как видно, разница температур составляет около 1 град за время проведения измерений (в городе теплее). Однако в ясные ночи, при радиационном выхолаживании, ситуация меняется, поскольку одна из точек измерений в городской среде расположена гораздо ближе к поверхности.

### Заключение

Использование методов дистанционного зондирования в метеорологической практике требует внимательного отношения к техническим деталям принципа измерений и к «модели восстановления» измеряемых характеристик. Не следует полагать, что элементарный статистический анализ наблюдаемых различий адекватно отражает особенности городской среды. Подобно использованию музыкального инструмента, применение высокотехнологичных инструментов дистанционного зондирования требует предварительной настройки и понимания основных принципов используемого метода измерения и присущих ему ограничений.

Эксперименты по сопоставлению данных дистанционного зондирования в их «естественной среде» эксплуатации, подобные проведенному ЦАО, МГУ и ФГУП «Мосэкомониторинг», помогают не только оценить фактическую разницу в профилях температуры в разных точках городской среды и загородной местности, но и изучить возможные причины этих различий, сопоставить их с достижимой точностью восстановления температурных профилей по данным дистанционных измерений, а также необходимы для правильной оценки возможностей дистанционного зондирования.

Проведенное исследование показало, что технические погрешности измерений и восстановления профилей температуры могут быть учтены при сопоставлении нескольких измерений и использовании сопутствующей информации.

Температурные профилемеры, такие как МТР-5, сохраняют высокую чувствительность к изменениям градиента температуры и на высотах более 500 м. Временные изменения в пространственно разнесенных точках на этих высотах происходят в значительной степени синхронно. Полученные результаты позволяют оценить ошибку восстановления средних градиентов температуры на высотах более 500 м в 0,1 °C/100 м. В то же время высотное разрешение температурных СВЧ-профилемеров падает с ростом высоты. По этой причине температурные профилемеры не разрешают высокие инверсии: над слоем конвекции (capping inversion), фронтальные, инверсии оседания, а чувствительны лишь к среднему градиенту температуры в верхней части АПС.

В настоящей работе предложены «опорные уровни» для профилемера МТР-5, расстояние между которыми согласовано с точностью восстановления температуры и наблюдаемой изменчивостью вертикальных градиентов.

«Угломерные» измерения, позволяющие восстанавливать профили температуры, обладают сильной коррелированностью ошибок по вертикали, т.е. ошибки восстановления температуры на разных высотных уровнях не являются независимыми и связаны с ошибками определения температуры в приземном слое. Из-за этого различия градиентов температуры ниже 300 м в разных точках измерений, особенно при устойчивой стратификации, могут быть связаны с вертикальной привязкой профилей. Даже для равнинных мегаполисов, таких как Москва, разница в высотах расположения профилемеров, а также орографические особенности места их установки существенно влияют на результаты сравнения.

Проведенное исследование показало, что распределение температурных различий в двух точках городской среды подобны распределениям различий температуры в городской и загородной местности, т.е. «пятнистость» температур в нижней части АПС имеет тот же порядок, что и «интенсивность» городского «острова тепла».

1. *Emeis S.* Surface-based remote sensing of the atmospheric boundary layer // Springer Science & Business Media. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. 2010. V. 40. 174 p.
2. *Wilczak J.M., Gossard E.E., Neff W.D., Eberhard W.L.* Ground-based remote sensing of the atmospheric boundary layer: 25 years of progress // Bound.-Lay. Meteorol. 25th Anniversary Vol., 1970–1995. Springer Netherlands, 1996. P. 321–349.
3. *Dabberdt W.F., Frederick G.L., Hardesty R.M., Lee W.C., Underwood K.* Advances in meteorological instrumentation for air quality and emergency // Meteorol. Atmos. Phys. 2004. V. 87, N 1–3. P. 57–88.
4. НПО «АТТЕХ». <http://attex.net/>
5. *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.
6. *Khaikine M.N., Kuznetsova I.N., Kadygrov E.N., Miller E.A.* Investigation of temporal-spatial parameters of an urban heat island on the basis of passive microwave remote sensing // Theor. Appl. Climatol. 2006. V. 84, N 1–3. P. 161–169.
7. *Миллер Е.А., Воробьева Е.А., Кадыгров Е.Н.* Анализ межсезонных и межгодовых особенностей температурной стратификации городского острова тепла // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 558–561.
8. *Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Куницын В.Е., Захаров В.И., Семутникова Е.Г., Карнов А.В., Курбатов Г.А., Сутанский С.И.* Московский остров тепла в блокирующем антициклоне летом 2010 г. // Докл. РАН. 2014. Т. 456, № 5. С. 591–595.
9. *Schönwald B.* Determination of vertical temperature profiles for the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry // Bound.-Lay. Meteorol. 1978. V. 15, N 4. P. 453–464.
10. *Гайкович К.П., Кадыгров Е.Н., Косов А.С., Троицкий А.В.* Термическое зондирование пограничного слоя

- атмосферы в центре линий поглощения кислорода // Изв. вузов. Радиофиз. 1992. Т. 35, № 2. С. 130–136.
11. *Троицкий А.В.* СВЧ-радиометрия земной атмосферы. Дис. ... д-ра тех. наук по спец. 01.04.03. Н. Новгород, 1994. 193 с.
  12. *Наумов А.П., Ошарина Н.Н., Троицкий А.В.* Наземное термическое зондирование атмосферы в микроволновом диапазоне // Изв. вузов. Радиофиз. 1999. Т. 42, № 1. С. 45–59.
  13. *Westwater E.R., Crewell S., Matzler C.* Surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere: A tutorial // IEEE Geosci. Remote Sens. Soc. Newsletter. 2005. V. 134. P. 16–33.
  14. *Kadygrov E.N., Pick D.R.* The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with *in situ* observations // Meteorol. Appl. 1998. V. 5. P. 393–404.
  15. *Вязанкин А.С., Кадыгров Е.Н., Мазурин Н.Ф., Троицкий А.В., Шур Г.Н.* Сравнение данных микроволнового радиометра и высотной метеорологической мачты при измерениях профиля температуры и структуры ее неоднородностей // Метеорол. и гидрол. 2001. № 3. С. 34–45.
  16. *Crewell S., Lohmert U.* Accuracy of boundary layer temperature profiles retrieved with multifrequency multiangle microwave radiometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45, N 7. P. 2195–2201.
  17. *Юшков В.* Что может измерять температурный профиломер? // Метеорол. и гидрол. 2014. № 12. С. 76–88.
  18. *Kadygrov E., Khaikin M., Miller E., Shaposhnikov A., Troitsky A.V.* Advanced atmospheric boundary-layer temperature profiling with mtp-5he microwave system. // Proc. WMO technical conference on instruments and methods of observation, 4–7 May, 2005, Bucharest, Romania (TECO-2005). URL: [https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO\\_2005/Posters/P3\(27\)\\_Russia%202\\_Kadygrov.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO_2005/Posters/P3(27)_Russia%202_Kadygrov.pdf)
  19. *Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И.* Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 24, № 7. С. 582–588.
  20. *Юшков В.П., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Курбатов Г.А., Крамар В.Ф.* Опыт использования доплеровского акустического локатора для измерения профиля скорости ветра в городских условиях // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2007. Т. 43, № 2. С. 193–205.
  21. *Каллистратова М.А., Петенко И.В., Шурыгин Е.А.* Содарные исследования поля скорости ветра в нижней тропосфере // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1987. Т. 23, № 5. С. 451–461.
  22. *Монин А.С., Обухов А.М.* Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. геофиз. ин-та СССР. 1954. Т. 24, № 151. С. 163–187.
  23. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.
  24. *Akasaka I., Ando H., Yokoyama H., Okubo S., Takahashi K., Izumi T., Mikami T.* High-spatial density meteorological observation system in Tokyo // J. Geogr. (Chigaku Zasshi). 2011. V. 120. P. 309–316.
  25. *Troitsky A.V., Gajkovich K.P., Gromov V.D., Kadygrov E.N., Kosov A.S.* Thermal sounding of the atmospheric boundary layer in the oxygen absorption band center at 60 GHz // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1993. V. 31, N 1. P. 116–120.
  26. *Кузнецова И.Н., Нахаев М.И.* Сезонные особенности термической структуры нижних слоев атмосферы в Московском мегаполисе по данным микроволновых измерений температуры // 80 лет Гидрометцентру России. М.: ТРИАДА ЛТД, 2010. С. 389–400.
  27. *Balsley B.B., Frehlich R.G., Jensen M.L., Meillier Y., Muschinski A.* Extreme gradients in the nocturnal boundary layer: Structure, evolution, and potential causes // J. Atmos. Sci. 2003. V. 60, N 20. P. 2496–2508.
  28. *Banta R.M., Mahrt L., Vickers D., Sun J., Balsley B.B., Pichugina Y.L., Williams E.J.* The very stable boundary layer on nights with weak low-level jets // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64, N 9. P. 3068–3090.
  29. *Folomeev V.V., Kadygrov E.N., Miller E.A., Nekrasov V.V., Shaposhnikov A.N., Troitsky A.V.* Advanced Microwave System for Measurement of ABL Thermal Stratification in Polar Region // Proc. WMO Techn. Conf. on Meteorological Instruments and Methods of Observations. Helsinki, Finland. 2010. URL: [https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-104-TECO-2010/P2\\_6\\_Folomeev\\_Russian\\_Federation.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-104-TECO-2010/P2_6_Folomeev_Russian_Federation.pdf)
  30. *Кадыгров Е.Н.* Пассивная радиолокация термической структуры атмосферного пограничного слоя. Дис. ... д-ра техн. наук по спец. 05.12.14. М., 2010. 287 с.
  31. *Oke T.R.* The urban energy balance // Progr. Phys. Geogr. 1988. V. 12, N 4. P. 471–508.
  32. *Arnfield A.J.* Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island // Int. J. Climatol. 2003. V. 23, N 1. P. 1–26.
  33. *Mirzaei P.A., Haghighat F.* Approaches to study urban heat island-abilities and limitations // Build. Environ. 2010. V. 45, N 10. P. 2192–2201.
  34. *Fukui Y.* A study on surface temperature patterns in the Tokyo Metropolitan area using ASTER data // Geosci. J. 2003. V. 7, N 4. P. 343–346.
  35. *Rotach M.W., Vogt R., Bernhofer C., Batchvarova E., Christen A., Clappier A., Feddersen B., Gryning S.-E., Martucci G., Mayer H., Mitev V., Oke T.R., Parlou E., Richner H., Roth M., Roulet Y.-A., Ruffieux D., Salmond J.A., Schatzmann M., Voogt J.A.* BUBBLE – an urban boundary layer meteorology project // Theor. Appl. Climatol. 2005. V. 81, N 3–4. P. 231–261.
  36. *Yamato H., Takahashi H., Mikami T.* New urban heat island monitoring system in Tokyo metropolis // Proc. 7th Int. Conf. on Urban Climate, Yokohama, Japan, June 2009. URL: [http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended\\_abstracts/pdf/375391-1-090516000046-006.pdf](http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/pdf/375391-1-090516000046-006.pdf)
  37. *Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И.* Трехпараметрическая модель турбулентности для атмосферного пограничного слоя над урбанизированной поверхностью // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2006. Т. 46, № 2. С. 476–494.

**V.P. Yushkov. Estimation of spatial heterogeneity of the thermal stratification in the boundary layer of the Moscow megalopolis from remote sensing.**

The results of a joint study of spatial heterogeneity and accuracy of retrieving temperature profiles in the atmospheric boundary layer over Moscow are analyzed. Measurements at three sites allowed estimating the spatial variability of thermal stratification in the megalopolis. The impact of local features of the observation sites on the retrieval error at all altitudes is shown. To reduce this impact, the retrieving of temperature lapse rate is suggested. Comparison of temperature gradients showed a decrease in the effect of local features in the range from 100 to 300 meters. The reference mesh based on the statistical variability analysis of the vertical temperature gradients is proposed.