

УДК 551.50:551.524.3

Дистанционное зондирование и мезомасштабные синоптические модели в изучении городского пограничного слоя

В.П. Юшков*

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

Поступила в редакцию 27.06.2016 г.

Анализируется роль инструментов дистанционного зондирования в улучшении понимания свойств пограничного слоя атмосферы. Показано, каким образом региональные синоптические модели могут служить инструментом обратного анализа (hindcasting) при изучении и совершенствовании моделей пограничного слоя. Предложена методика оценки качества воспроизведения пограничного слоя в этих моделях по данным дистанционных измерений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мезомасштабная модель, пограничный слой, мегаполис, городская аномалия, обратный статистический анализ; remote sensing, mesoscale models, boundary layer, megalopolis, urban anomaly, hindcasting.

Введение

Региональные модели прогноза динамики атмосферы, опирающиеся на глобальные синоптические модели циркуляции для задания граничных и начальных условий, получили широкое распространение в последнее десятилетие. Такие мезомасштабные модели более точно описывают оротографию и гидрографию изучаемого ландшафта, изменчивость подстилающей поверхности (альbedo, шероховатость), а также процессы в пограничном слое (турбулентность, испарение и перенос влаги с поверхности). Однако критерии оценки их качества остались теми же, что и для крупномасштабных синоптических моделей. Так, наиболее употребительным критерием является точность воспроизведения приземных полей температуры и давления на метеостанциях, понимаемая в смысле среднеквадратичного отклонения [1]. Однако мезомасштабные модели позволяют оценивать не только сходство наблюдаемых и прогнозируемых полей температуры, но и другие показатели качества численного моделирования.

Синоптические модели нацелены, прежде всего, на правильное описание аномалий геопотенциала изобарических уровней и крупномасштабных квази-геострофических течений. Поэтому для улучшения прогноза погоды наиболее актуально аккуратное усвоение данных глобальных наблюдений. Ошибки же описания атмосферного пограничного слоя (АПС) практически не входят в «ценовую функцию» этого усвоения. Для моделей прогноза погоды, например, турбулентные потоки тепла и импульса в АПС —

лишь малый «форсинг». По этой причине ошибки воспроизведения характеристик турбулентного перемешивания и конвекции в АПС не очень существенны в сравнении с ошибками моделирования облачности и радиационных потоков в атмосфере. Для моделей же переноса загрязнений, сдвига ветра в АПС, ветровых порывов, мелкой конвекции именно процессы перемешивания и динамики атмосферного пограничного слоя являются ключевыми.

Такие модели не нацелены на лучший прогноз с точки зрения стандартных оценок воспроизведения поля приземного давления и температуры, поэтому критерии их качества должны формироваться исходя из целей исследования. Для оценки их точности можно использовать новые инструменты наземного дистанционного зондирования, которые пока еще имеют локальную область покрытия.

Для задач прогноза погоды методика усвоения данных наблюдений в мезомасштабных моделях (FDDA или 4DVar) хорошо разработана (см. [2]). Однако, если мы имеем оптимальную в практическом смысле модель или множество таких моделей, например, с различной параметризацией АПС, то новые наблюдения, например, характеристик турбулентного перемешивания, позволяют из этого множества выбрать подмножество, удовлетворяющее критериям оптимальности, не связанным с точностью синоптического прогноза. В таком случае методика усвоения новых данных и оценка качества мезомасштабных синоптических моделей приобретает практический смысл.

Для задач распространения загрязнений в атмосферном пограничном слое показателем качества модели является способность правильно воспроизводить в нем вертикальные профили скорости ветра и температуры, тесно связанные с турбулентными

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

потоками тепла и импульса, а также влаги и загрязняющих примесей. Анализ ошибок воспроизведения вертикальных профилей температуры и скорости ветра в синоптических моделях по сравнению с результатами их дистанционных измерений позволяет оценить качество той или иной мезомасштабной модели, подобрать подходящую для выбранного разрешения параметризацию физических процессов в АПС, понять причины и оценить частоту появления значительных отклонений от данных наблюдений.

Одна из актуальных задач физики пограничного слоя — анализ воздействия городской среды на атмосферные течения вблизи поверхности, перенос и рассеяние загрязняющих примесей [3]. Общим местом, в свете проблемы «глобального потепления», стало указание на роль городского острова тепла (УНТ) в формировании пространственных различий поля приземной температуры. Вместе с тем влияние городской среды на атмосферные процессы проявляется не только в образовании дополнительного источника тепла, но и в увеличении шероховатости, изменении альбедо и поверхностного стока, а также в мозаичности характеристик подстилающей поверхности. Но оценки этого влияния на динамику и турбулентность АПС даже в крупных мегаполисах, таких как Московский, пока далеки от стандартов надежности и достоверности. Поэтому для *количественной* оценки влияния городской среды на процессы переноса в пограничном слое нужны не только измерения, но и детальные модели, а также их сопоставление в целях улучшения качества воспроизведения характеристик АПС.

Для выбора наилучшей или достаточной для целей исследования параметризации в последние годы появилась возможность сравнения накопленных данных синоптического моделирования и параллельных измерений. В англоязычной литературе для этой методики прижился термин *hindcast*, который можно перевести как «обратный статистический анализ». Для целей этого анализа сохраняют только «проекцию» полного поля «вектора состояния» модели на «вектор наблюдений», обычно весьма ограниченный в пространственной области. Так, в настоящей работе анализируются профили температуры и скорости ветра лишь в трех точках измерений.

Настоящая работа направлена на решение вопроса о способности региональных моделей воспроизводить пространственные неоднородности пограничного слоя на масштабах крупного мегаполиса. Результаты исследования должны показать возможность использования небольшого числа имеющихся точек дистанционных измерений в АПС для оценки моделей, а самих моделей в последующем — для количественной оценки воздействия городской среды на течения в пограничном слое.

С этой целью в статье анализируются результаты сопоставления профилей температуры и скорости ветра, измеренных дистанционно в нескольких точках городской среды и загородной местности и воспроизведенных в 2 региональных гидродинамических моделях, участвующих в программе оценки

качества синоптических прогнозов Гидрометцентра России.

1. Городская аномалия в АПС

Поскольку влияние городской среды связано не только с повышением приземной температуры (УНТ), но и с увеличением шероховатости, а также изменением альбедо и поверхностного стока, в дальнейшем для удобства используется термин «городская аномалия» (ГА). Применение мезомасштабных моделей для количественной оценки характеристик ГА пока еще не стало привычным подходом, хотя и существенно расширилось в последние годы [4–8]. В мировой практике наибольшее распространение в оценке интенсивности ГА получили контактные приземные измерения, поскольку их проведение не связано со значительными техническими трудностями и потому что вблизи поверхности локальные метеорологические особенности ГА выражены сильнее всего.

Однако приземные измерения не позволяют оценить высотную протяженность ГА и, например, высоту городского слоя шероховатости (*roughness* или *wake layer*), правильность задания характеристик подстилающей поверхности в модели. Поэтому влияние приземной ГА на динамику атмосферных движений и турбулентности, а также перенос загрязнений оценить количественно весьма затруднительно. Сложной проблемой является и недостаточная детальность мезомасштабных моделей в описании турбулентного перемешивания в городской среде. Такие модели используют лишь самую простую параметризацию городского АПС, поскольку для более детального моделирования отсутствует необходимая «входная» информация.

Различия в полях приземной температуры при разных параметризациях городского пограничного слоя зачастую составляют лишь малую долю общих модельных ошибок, а их основная часть связана с описанием синоптического процесса. Но ошибки анализа или прогноза общей синоптической ситуации не характеризуют ошибки описания городской территории, свойственные большинству «модельных» работ (см., например, [5, 6]).

Сравнение моделей и измерений в городской среде часто рассматривается и демонстрируется лишь при «идеальной» или стационарной синоптической ситуации (*case study*), с ярко выраженным суточным ходом потока тепла (ср. [5]). Это вполне оправданно на первом этапе исследования, но не отменяет необходимости общего статистического анализа наблюдаемых пространственных различий. На практике необходимо представлять не только максимальные или возможные отклонения температур вблизи городской поверхности от значений в загородной местности, но и повторяемость (частоту) различных синоптических ситуаций, а главное — точность численных оценок. Разумеется, статистический подход широко применяется для анализа ГА и при отсутствии какой-либо гидродинамической модели (см., например, [9]). Но опора лишь на данные измерений не позволяет решить вопрос, как соотно-

сятся точности измерения ГА и модельных результатов. Такой статистический подход не обладает нужной общностью, так как измерения проводятся лишь в отдельных точках наблюдений, и непонятно, как можно обобщить полученные статистические данные.

«Климатические» оценки *модельных* отличий температур и скоростей ветра уже проводились для некоторых крупных городов (см. [7, 8]), однако за рамками анализа остался принципиальный вопрос о точности таких мезомасштабных климатических моделей для описания ГА. Понятно, что если в городской агломерации задать дополнительный источник тепла, например в форме уменьшения альbedo поверхности или антропогенного «форсинга», то локально над этой территорией поверхностная температура, конечно, изменится. Но насколько точны такие модельные проекции выше приземного слоя? И как, например, изменение альbedo повлияет на локальную турбулентную циркуляцию над городом?

Именно для оценки возможностей и точности мезомасштабного синоптического моделирования в настоящей работе предпринята попытка совместить статистический подход, хорошо развитый в климатическом моделировании, и высокую точность синоптических гидродинамических прогнозов на короткий срок (0–24 ч). Цель такого статистического анализа — выявить разнообразие пространственных различий измеряемых характеристик в городской и загородной местностях при различных синоптических условиях и показать, чем он отличается от стандартной оценки модельных уклонений (bias) и дисперсии ошибок (RMSE).

2. Синоптические модели и точки измерений

Разработка физических моделей пограничного слоя традиционно связана с детальным анализом характеристик течений в идеализированных и строго контролируемых условиях. Так, для разработки моделей турбулентного перемешивания в АПС стараются отбирать стационарные синоптические ситуации в условиях однородной подстилающей поверхности. Сама математическая теория при этом опирается на асимптотические предположения, чтобы исключить из анализируемых уравнений по возможности большую часть членов. По этой причине при сопоставлении модельных синоптических полей и наблюдений следует учитывать не только ошибки последних, но и ограниченную точность физических параметризаций турбулентного перемешивания в условиях неоднородного и нестационарного синоптического процесса.

Следует отметить, что дистанционные средства зондирования пограничного слоя пока еще не стали широко распространенными инструментами измерений. Такие измерения часто прерываются, не являются вполне одинаковыми в разных точках (разные модификации приборов, частота зондирования и т.п.), имеют разные временные параметры проведения измерений и осреднения данных. То есть ря-

ды измерений статистически сильно неоднородны. Численные мезомасштабные модели, ставшие широко доступными лишь в последние годы, также могут существенно отличаться по пространственному разрешению, выбору параметризаций, временному представлению результатов. Тем не менее от проводимого анализа требуется, чтобы его выводы не зависели от выбора средств измерений и были одинаковыми для разных моделей. В связи с этим представляется важным использовать для сопоставления несколько, хотя бы 2–3, мезомасштабных моделей одного класса и несколько типов измерений.

В нашем исследовании удалось совместить эти требования, хотя и не все одновременно. Для анализа были доступны результаты мезомасштабного моделирования в двух моделях: WRF-ARW и COSMO-RU, а также данные наблюдений в пограничном слое над Московским мегаполисом контактными и дистанционными средствами. Причем в двух случаях эти измерения проводились одновременно в непосредственной близости (в одной точке): измерение температуры на Останкинской башне температурным профилимером МТР-5 с высотой зондирования до 1000 м и измерения 2 профилимерами разного типа (работающими на разных частотах и с разной высотой зондирования: до 600 и до 1000 м) в пункте измерений МГУ. Кроме этого дистанционные измерения профилей температуры в Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (ЦАО) проводятся в непосредственной близости от точки аэрологического зондирования в Московском регионе.

Всего в Московской обл. существует 6–7 точек, в которых непрерывно измеряются основные характеристики пограничного слоя: температура и скорость ветра. Наибольшей длительностью, постоянством, надежностью характеризуются измерения температуры и скорости ветра на Останкинской башне на высотах 85, 128, 201, 253, 305, 385 и 503 м. Рядом проводятся дистанционные измерения профилей температуры с помощью СВЧ профилимера МТР-5 [10]. Координаты этой точки измерений 55°49'16,39" с.ш., 37°36'45,04" в.д., высота установки температурного профилимера над поверхностью 4 м.

В ЦАО расположена 2-я точка измерений профилей температуры (координаты 55°55'30,43" с.ш., 37°31'24,26" в.д., высота установки 20 м от поверхности). Здесь измерения проводятся уже многие годы при участии разработчиков прибора МТР-5 и контролируются запуском аэрозондов в непосредственной близости от места измерений. Третья точка, в которой накоплены достаточно длинные ряды профилей температуры и скорости ветра в АПС, находится на Воробьевых горах (МГУ, координаты 55°42'00,28" с.ш., 37°31'45,30" в.д., высота установки – 40 м от поверхности). Профили скорости ветра в этой точке измеряются с помощью акустического локатора (содара) LATAN-3 [11]. Еще одна точка «городских» измерений профилей температуры – район Косино, мусоросжигательный завод № 4 (координаты 55°43'3,09" с.ш., 37°56'13,20" в.д., высота над поверхностью 4 м). Эти данные предоставлены

ФГУП «Мосэкомониторинг». (Экологическая актуальность является важным пунктом проводимого исследования.)

Центр Москвы — 5-я точка (55°44'20,81" с.ш., 37°37'23,57" в.д., высота над поверхностью 13 м). Содарные измерения скорости ветра в Институте физики атмосферы (ИФА) РАН хорошо известны во всем мире [12]. В последнее время эти измерения были дополнены измерениями профилей температуры. Шестая, загородная, точка — Звенигородская научная станция (ЗНС) ИФА РАН (55°41'44,14" с.ш., 36°46'32,18" в.д.). Здесь одновременно измеряются профили скорости ветра и температуры, а также осуществляются градиентные измерения высокочастотных турбулентных пульсаций (акустическим анемометром) на высотах 6 и 56 м.

Продолжительное время проводились измерения и в других пунктах наблюдений: Тушино, Красная Пресня [13]. Их результаты могут быть использованы для исторических реконструкций и сравнений. Еще одна возможная точка длительных надежных контактных измерений в АПС — высотная метеорологическая мачта ВММ-310 НПО Тайфун, г. Обнинск (55°06'41,73" с.ш., 36°35'53,38" в.д.) [14]. Эти данные также можно привлекать к анализу модельного описания АПС Московского мегаполиса, поскольку они характеризуют значительные пространственные различия на мезомасштабах, оставаясь «одной точкой» глобального синоптического прогноза.

3. Результаты сопоставления. Вероятностный подход

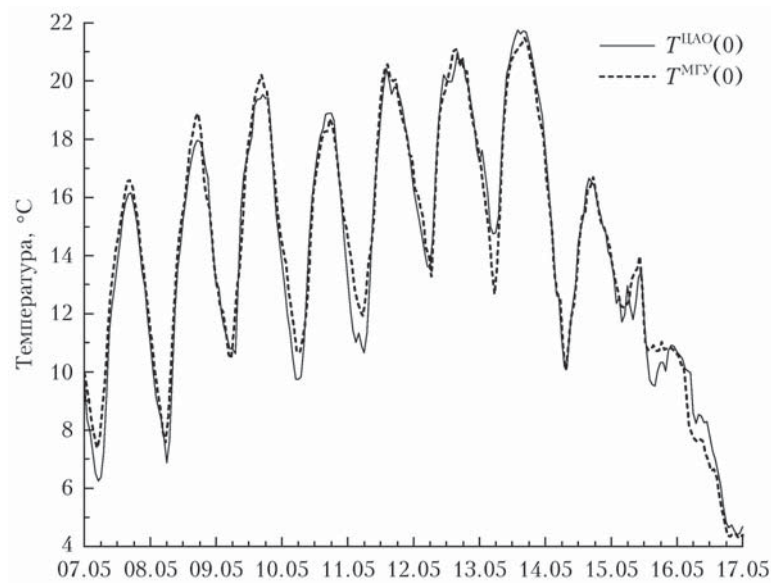
Первый результат, который необходимо отметить при сопоставлении измерений и модельных рядов — это существенно разная статистика изменчивости полей температуры и скорости ветра. Если ряды температур в двух достаточно удаленных точках (~25 км) близки друг к другу (рис. 1, *a*), то ряды скоростей (рис. 1, *b*) обладают значительно меньшей корреляцией, разница скоростей имеет тот же порядок, что и само значение скорости, спектр изменчивости сдвинут в более высокочастотную область. Эту, в целом известную, особенность рядов различных характеристик редко отмечают в статистических сопоставлениях, хотя ее обязательно следует учитывать при сравнении с модельными результатами: временные ряды различных характеристик имеют разные спектры, а их модельное описание «вырезает» из полного спектра ту низкочастотную часть, которая определяется пространственной сеткой и временным шагом модели. Используемый же многими исследователями «коэффициент корреляции» между модельными и наблюдаемыми временными рядами игнорирует эту разницу в спектрах. По этой причине, например, среднеквадратичные отклонения (СКО) между полями скорости ветра в модели и в данных наблюдений не характеризует «ошибку» синоптической модели, поскольку такие модели в значительной степени лишь «параметризуют» мезомасштабную изменчивость скорости ветра. Другими словами,

СКО для ветра и температуры — это совершенно разные характеристики качества синоптической модели. Сложившаяся же при формальном статистическом подходе практика обобщенного толкования вектора состояния **X-bold** и ошибки его определения $\delta\mathbf{X}\text{-bold}$ как общей векторной характеристики часто не учитывает эти *физические* различия. Термин «физический» здесь означает, что вероятностный анализ должен учитывать различие законов сохранения. Кроме того, при вероятностном подходе необходимо принимать во внимание, что неопределенность или «шум» в уравнении Лнувилля [15] определяются различным образом в зависимости от выбора физической характеристики (см. подробнее [16]).

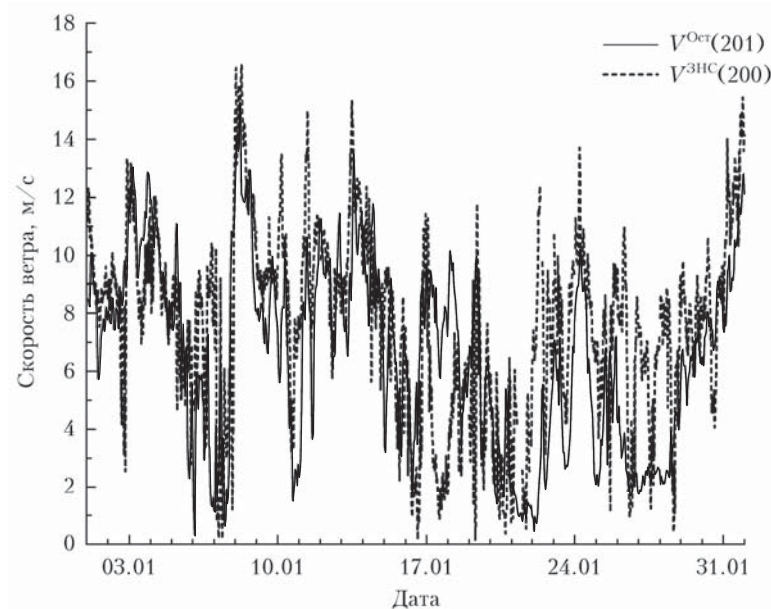
На рис. 1, *b* показано, что в отдельные дни скорости на одной высоте (200 м) могут отличаться в 3 раза и более, при этом повторяемости различных значений скорости ветра в двух достаточно удаленных (~50 км) точках за длительный срок измерений (месяц и более) близки друг к другу (рис. 2, *a*). Детальный анализ показывает, что такие сильные различия возникают в силу динамических причин, при формировании приподнятого сдвига скорости ветра или низкоуровневого струйного течения (LLJ) [17]. Кроме того, турбулентное перемешивание над мегаполисом формирует приземный слой вытеснения, значительно превышающий среднюю высоту городских зданий. Возникновение такого слоя отмечалось ранее в исследованиях поля скорости ветра над Москвой [18]. Заметим, что этот слой вытеснения не постоянен и зависит от соотношения между естественным балансом тепловых потоков (сезона, времени суток, облачности) и антропогенной составляющей (выбросов тепла).

Чтобы в целом оценить качество синоптического моделирования в пределах и окрестностях мегаполиса, можно сравнивать компоненты скорости ветра и температуры не «поточечно», а статистически — по функции распределения (CDF). Такая методика сопоставления предполагает, что разница скоростей в двух точках наблюдений будет случайной функцией, а результаты моделирования должны правильно воспроизводить лишь форму этой функции распределения, а не «предсказывать» каждое значение скорости ветра. Другими словами, ошибка в прогнозе или реанализе поля скорости ветра является допустимой и связывается с подсеточными динамическими процессами в АПС, но влияние ГА на поле скорости ветра статистически должно описываться максимально точно.

Сравнение *векторных* полей скорости ветра, измеряемого и модельного, следует проводить покомпонентно, так как распределение синоптической изменчивости компонент скорости близко к нормальному [19]. Медианы распределения разности компонент показывают, правильно ли модель описывает общее изменение скорости ветра вблизи поверхности и направление переноса. Влияние городской среды на атмосферное течение, в связи с изменением шероховатости и формированием городского слоя вытеснения (canopy layer и roughness layer), должно проявляться именно в изменении функции распределения



a



б

Рис. 1. Фрагменты суточного хода и температуры в городской и пригородной точках измерений (в МГУ и ЦАО) на высоте установки температурных профиломеров (20 и 40 м соответственно) в мае 2015 г. (*a*); суточный ход скорости ветра в городе и в загородной местности (Останкино и Звенигород) на высоте около 200 м в январе 2015 г. (*б*)

этих компонент. Поскольку функция распределения характеризует все синоптическое множество скоростей над поверхностью, влияние ГА будет описываться «в среднем», а не для каждой отдельной синоптической ситуации.

На рис. 2, *a*, *б* показаны примеры такого сопоставления для зональной компоненты скорости ветра для пары точек в городской и загородной местности (Останкино и ЗНС). Период измерений и высота выбраны такими же, как и на рис. 1, *б*, чтобы показать, что, несмотря на значительные «случайные» или синоптические различия поля скорости ветра,

климатология поля скорости на этой высоте одинаковая как в городской, так и в загородной местности. Несовпадение «модельной» климатологии поля ветра в двух точках будет свидетельствовать об ошибках описания пограничного слоя.

Проведенное исследование показало, что сравнения месячных статистик все же недостаточно в силу значимой случайной синоптической изменчивости на масштабах порядка 10 дней. Эмпирические функции распределения становятся более гладкими при сравнении сезонных (3-месячных) распределений (см. рис. 2, *a*, *б* и 3, *б*).

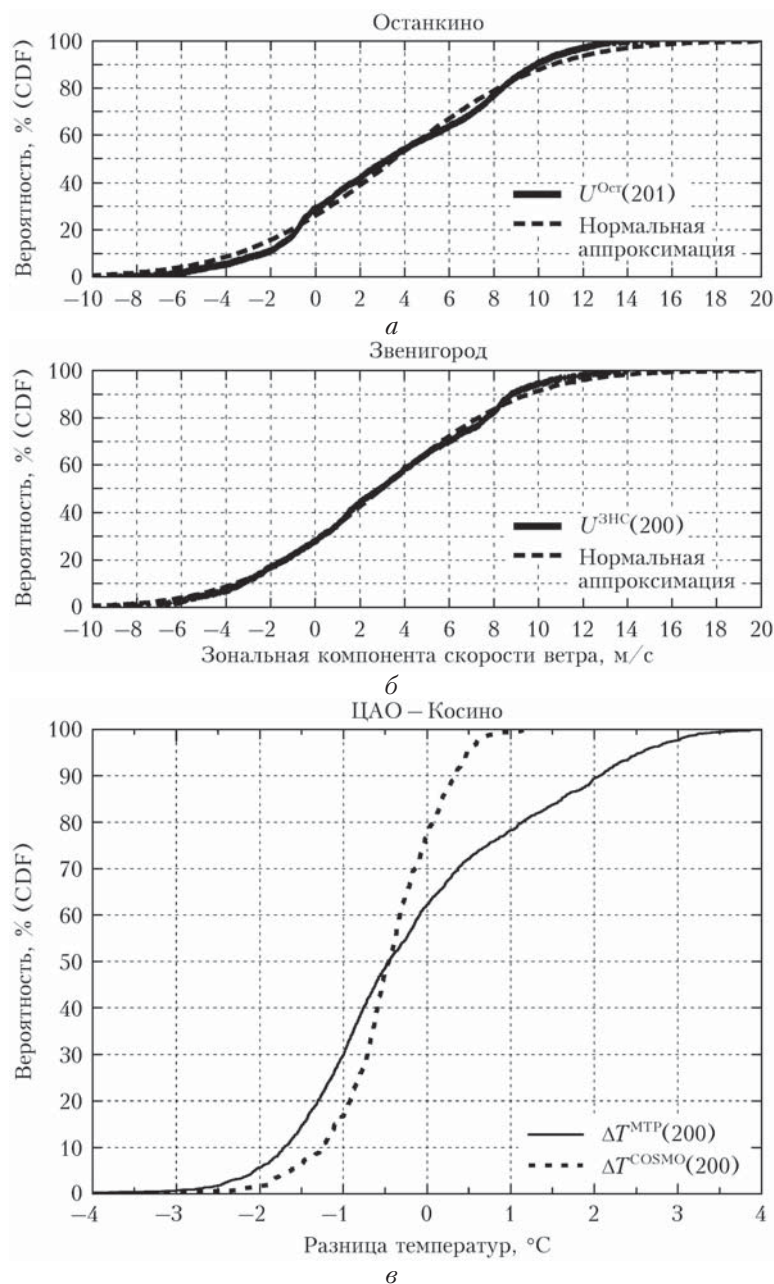


Рис. 2. Эмпирические распределения зональной компоненты скорости ветра в городской (а) и загородной (б) точках наблюдений и их аппроксимация нормальным распределением для *одного* месяца измерений (январь 2015 г.), распределение разницы температур в двух точках (ЦАО – Косино) на высоте 200 м по данным измерений и в модели COSMO (июнь–август 2015 г.) (в)

3.1. Синоптическая изменчивость и пространственная разность температур

Если при разработке мезомасштабной модели предполагается, что она должна описывать ГА, то пространственные различия температур в двух точках измерений не должны в ней сглаживаться. Это означает, что функция распределения (CDF) или повторяемость различных значений разницы температур в модели и наблюдениях должны быть близки. На рис. 2, в приведен лишь один пример сопоставления функции распределения различий температур

в двух точках по модельным данным и результатам измерений. Видно, насколько это предположение отличается от реальности. Хотя медианы распределений модельных и измеряемых разностей практически совпадают (средние разности близки), повторяемость больших положительных и отрицательных значений разницы в наблюдениях и в модели существенно отличается. То есть эта модель не описывает важные особенности локальной циркуляции и турбулентного перемешивания в окрестности ГА.

Чтобы понять, в какой степени распределения температур отличаются на разных высотах, для анализа были выбраны четыре высоты: 50, 200, 500

и 1000 м. Сопоставление на высоте 50 м позволяет «уйти» от локальных особенностей, связанных, в том числе, с разной высотой установки температурных профиломеров в различных точках наблюдений [20]. На этой высоте еще должна сохраняться характерная интенсивность ГА (пространственная разница температур).

Измерения на высоте 200 м характеризуют «высотную протяженность» ГА или скорость ее затухания с высотой. Измерения на высоте 500 м должны показывать различия ГА при устойчивой и неустойчивой стратификациях. Вне городской среды уровень 500 м обычно находится выше ночного слоя перемешивания в остаточном слое (residual layer), а в дневные часы — в конвективном слое перемешивания.

Измерения температуры на уровне 1000 м свидетельствуют, что пространственные неоднородности на нем уже ниже точности измерений. Следовательно, функция распределения различий характеризует инструментальные ошибки измерений, а не пространственные различия. Сопоставление этих ошибок с функциями распределения на уровне 500, 200 и 50 м показывает «долю» собственно пространственных различий или их «измеримость» температурными СВЧ профиломерами.

Сравнение распределений разницы температур между разными парами точек показало, что наибольшие различия наблюдаются при устойчивой стратификации (в ночные часы). При этом распределение положительных вариаций в ночные часы практически не зависит от высоты. Этот факт, как показал опыт анализа профилей температуры над Москвой [21], может быть связан с вертикальной коррелированностью ошибок измерений. Он требует дальнейшего изучения. В дневные часы, при конвективном перемешивании, разница температур в двух точках измерений значимо меняется с высотой, что косвенно свидетельствует о вертикальной протяженности ГА.

В модельных результатах распределение пространственной разницы температур также практически не зависит от высоты, а главное, эти вариации отличаются существенно меньше, чем в измерениях (см. рис. 2, б), при том что медианы распределений весьма близки. Можно представить, что модели в значительной мере искусственно изменяют разницу температур между городской и сельской местностью, изменяя характеристики подстилающей поверхности. В самом деле, уменьшив эффективное альbedo города (например, увеличив долю битумного покрытия поверхности), можно получить локальное нагревание, как бы «остров тепла». Наблюдения же показывают, что разница температур между городом и пригородом может быть не только положительной, но и отрицательной, а также сильно варьировать в зависимости от синоптической ситуации, направления ветра и выбора точек наблюдения.

Расчеты распределений были проведены для разных сезонов года, а также отдельно для ночных (00 UTC) и дневных (12 UTC) «модельных» часов. Хотя результаты для разных интервалов сравнения и разных точек наблюдения различаются в целом,

пространственная разница в данных наблюдений демонстрирует распределения, которые пока не описываются выбранными моделями. Для более адекватного воспроизведения изменчивости ГА требуется большая детальность в описании пространственной неоднородности городской среды. Теоретически можно надеяться, что в моделях с лучшим пространственным разрешением пространственная изменчивость ГА не будет отфильтрована. Другой возможный подход — сопоставление наблюдаемой пространственной неоднородности и изменчивости температуры в городской среде с некоторым коэффициентом пространственной «диффузии», который мог бы качественно параметризовать характеристики турбулентного перемешивания. При этом, несмотря на то что поля средних величин будут сглаженными, неоднородность подстилающей поверхности можно будет учесть как подсеточный процесс. В этом случае найденные в измерениях характеристики мезомасштабной изменчивости должны найти свое отражение в параметрах турбулентного перемешивания.

3.2. Изменчивость и коррелированность вариаций скорости ветра в разных точках городской среды

Акустические дистанционные измерения скорости ветра в АПС над городом связаны со многими трудностями [22]. Поэтому сопоставление результатов моделирования и данных измерений должно проводиться особенно тщательно. Первым шагом должна стать оценка ошибок дистанционных измерений, их корректировка взаимным сравнением, оценка пространственной неоднородности и коррелированности временных изменений. На рис. 3, а показан фрагмент временного ряда одной из компонент скорости ветра (зональной). Видно, что уже на высоте 200 м среднечасовые значения скорости ветра, измеренные в двух точках, хорошо коррелирует во времени. Пропуски в данных показывают периоды недостаточной достоверности измерений. Они также указывают, что статистический подход к сравнению моделей и данных измерений оправдан и этим аспектом: случайностью пропусков в данных непрерывного мониторинга.

Статистически распределение пространственных различий скорости ветра в двух синоптически близких точках является вполне предсказуемым — практически нормальным (покомпонентно), как показано на рис. 3, б, сохраняя динамическую «случайность». Это означает, что синоптические мезомасштабные модели можно сравнивать между собой по степени близости к наблюдаемому распределению разности скоростей. Отметим, что в этом распределении высокочастотная компонента изменчивости скорости ветра уже отфильтрована. Для фильтрации использовался фильтр Ханна (косинусное окно) с часовым масштабом осреднения.

Синоптические модели, как известно, описывают только эту, медленную, компоненту изменений скорости ветра, даже если они не используют приближение гидростатики. Разные типы мезомасштабных

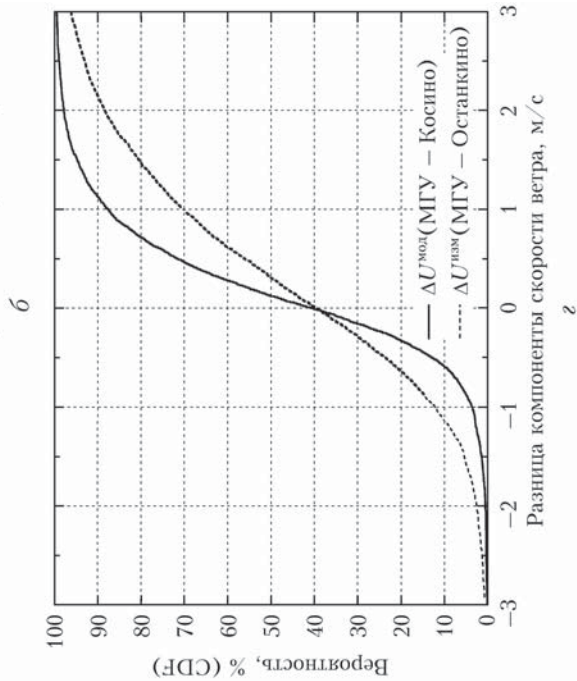
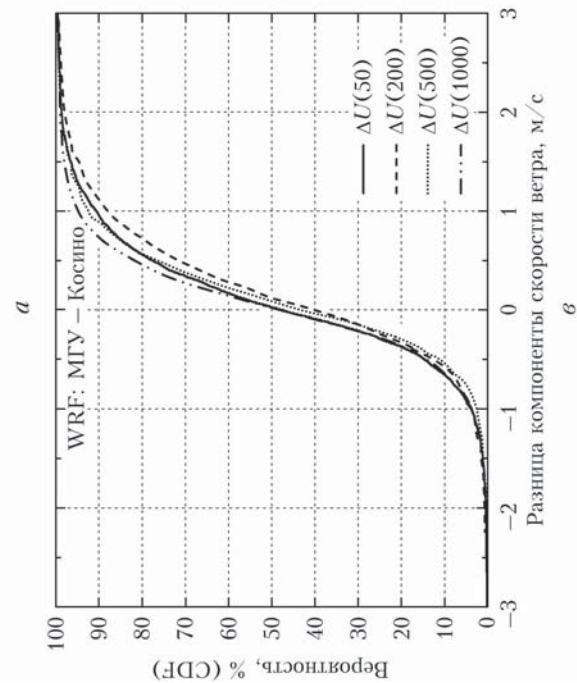
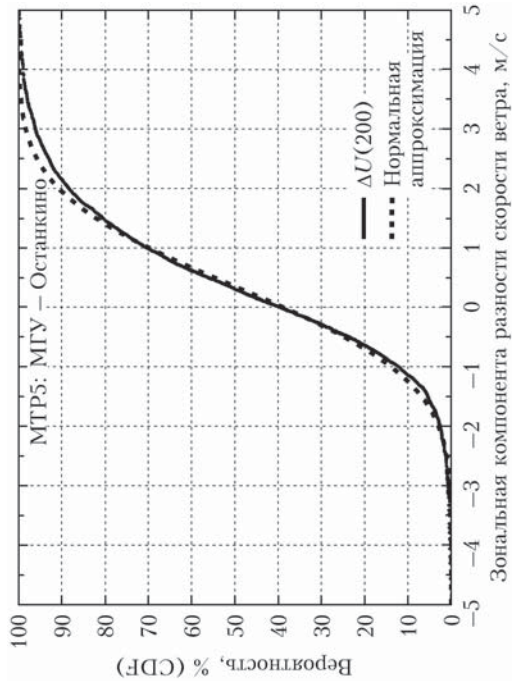
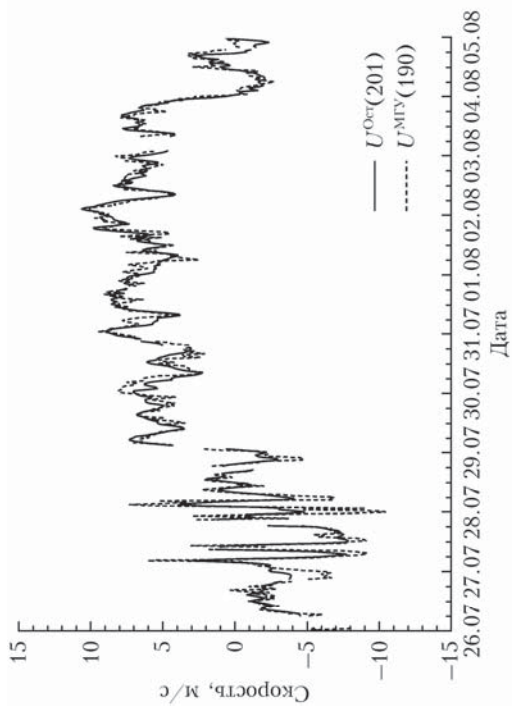


Рис. 3. Фрагмент временного хода зональной компоненты скорости ветра в двух «городских» точках (а) и функция распределения разницы этой компоненты за 3 мес измерений (б) (июнь – август 2015 г.); распределение разницы этой компоненты скорости ветра в модели WRF и изменение распределения с высотой (в); сопоставление распределений разницы зональной компоненты скорости в двух точках на высоте 200 м по результатам моделирования и данным наблюдений (г)

моделей могут по-разному фильтровать пространственную и временную, так называемую подсеточную, изменчивости скорости ветра в зависимости от численной схемы. А поскольку пространственное и временное разрешения мезомасштабных моделей могут сильно отличаться, способность описывать особенности ГА может значительно варьироваться в зависимости от выбора и характеристик модели.

На рис. 3, *в* видно, что распределение разности скорости ветра в двух точках в модели WRF практически не зависит от высоты. Максимум дисперсии приходится на уровень 200 м (roughness layer), где в достаточной степени варьируют как скорость ветра, так и термическая стратификация АПС. Поэтому этот уровень является оптимальным для сравнения моделей и измерений. На рис. 3, *г* показано, что выбранная для сопоставления мезомасштабная модель пока недооценивает изменчивость пространственной неоднородности на указанном уровне, при том что разные измерения скорости ветра показывают высокую коррелированность (см. рис. 3, *а*), заметно превышающую коррелированность между модельным и измеряемыми рядами компонент скорости ветра.

3.3. Пространственные различия вертикальных градиентов температуры

В [20] было показано, что из-за разницы в высоте установки температурных профиломеров над поверхностью в разных точках Московского мегаполиса они в разной степени захватывают приземный логарифмический «скачок» температуры. Поэтому неопределенность «нулевого уровня» для температурных профиломеров в городской среде, а также сильное влияние места установки контрольного внешнего датчика температуры могут существенно исказить представление об интенсивности и вертикальной протяженности ГА [23].

Сопоставление модельных и инструментальных профилей температуры в АПС над Московским мегаполисом выявило, что различия восстановленных профиломерами температур на высотах более 500 м обусловлены в основном используемой методикой решения обратной задачи [24] и вертикальной коррелированностью ошибок [20]. Для борьбы с последней можно использовать сопоставление вертикальных градиентов температуры на разных высотах.

Проведенный анализ показал быстрое уменьшение *пространственных различий* вертикальных градиентов температуры с высотой, что контрастирует с расчетами эмпирических распределений разницы температур (см. рис. 2, *в*). Этот результат свидетельствует о связности по вертикали ошибок измерений.

Вне приземного слоя, на больших высотах (500–1000 м) временной ход вертикальных градиентов температуры в достаточно разнесенных точках, как показывает рис. 4, *а, б*, оказывается практически синхронным. То есть измерения градиентов температуры обладают достаточной точностью для сопоставления с результатами численного моделирования. В то же время модельные данные показы-

вают во многом случайный разброс между точками измерений и относительно наблюдаемого ряда, сохраняя все же правильное «среднее» поведение на длительных интервалах сравнения.

На рис. 4, *б* подобное сопоставление показано для другой пары точек, на другой высоте и для другой модели. На качественном уровне модель WRF даже лучше оценивает вертикальные градиенты температуры, чем модель COSMO. Но и эта оценка существенно отличается от результатов измерений по суточной амплитуде вариаций.

Вертикальные градиенты температуры (lapse rate) имеют четко выраженный суточный ход. В связи с этим, конечно, имеет смысл строить распределения разницы этих градиентов не только для всего времени наблюдений, но и для отдельных часов. Картина суточного хода позволяет хорошо различать особенности каждой точки наблюдений (см. [20]) и сравнивать эти различия с модельными расчетами.

Неожиданным оказывается результат общего статистического сопоставления (рис. 4, *в*). Измерения показывают *меньший* разброс вертикальных градиентов температуры над Московским мегаполисом, чем модельные оценки. Вероятно, многие мезомасштабные модели не учитывают пространственных сглаживающих свойств турбулентного перемешивания, которое становится заметным в данных измерений при длительном интервале осреднения (30–60 мин).

По-видимому, рассчитывать на «правильное» описание ГА в синоптических моделях пока рано. Однако у нас появляется цель, к которой должна стремиться модель, претендующая на описание ГА.

3.4. Источники тепла, скорость нагревания/остывания и временные изменения температуры в АПС

Проведенное сопоставление модельных расчетов и данных наблюдений показало, что синоптические мезомасштабные модели весьма аккуратно воспроизводят суточный ход температуры (что связано с непрерывным усвоением глобальных данных), а суточный ход временных приращений является надежным индикатором эффективности синоптического прогноза. По данным измерений и численного моделирования эти характеристики весьма близки как для отдельных дней и при изменении синоптической ситуации, так и для распределений в отдельных точках. Следует, однако, указать, что эта оценка эффективности или качества синоптического моделирования будет практически одинаковой для всех синоптических моделей, т.е. она не позволяет выделить лучшую модель для описания ГА.

Несколько измерений в городской среде и загородной местности позволяют рассчитывать пространственные различия скорости нагревания/остывания АПС и сравнивать различные мезомасштабные модели между собой. На рис. 5, *а* показан фрагмент временного хода сглаженных часовых приращений температуры в двух точках наблюдений на высоте 500 м, т.е. выше области локальных особенностей

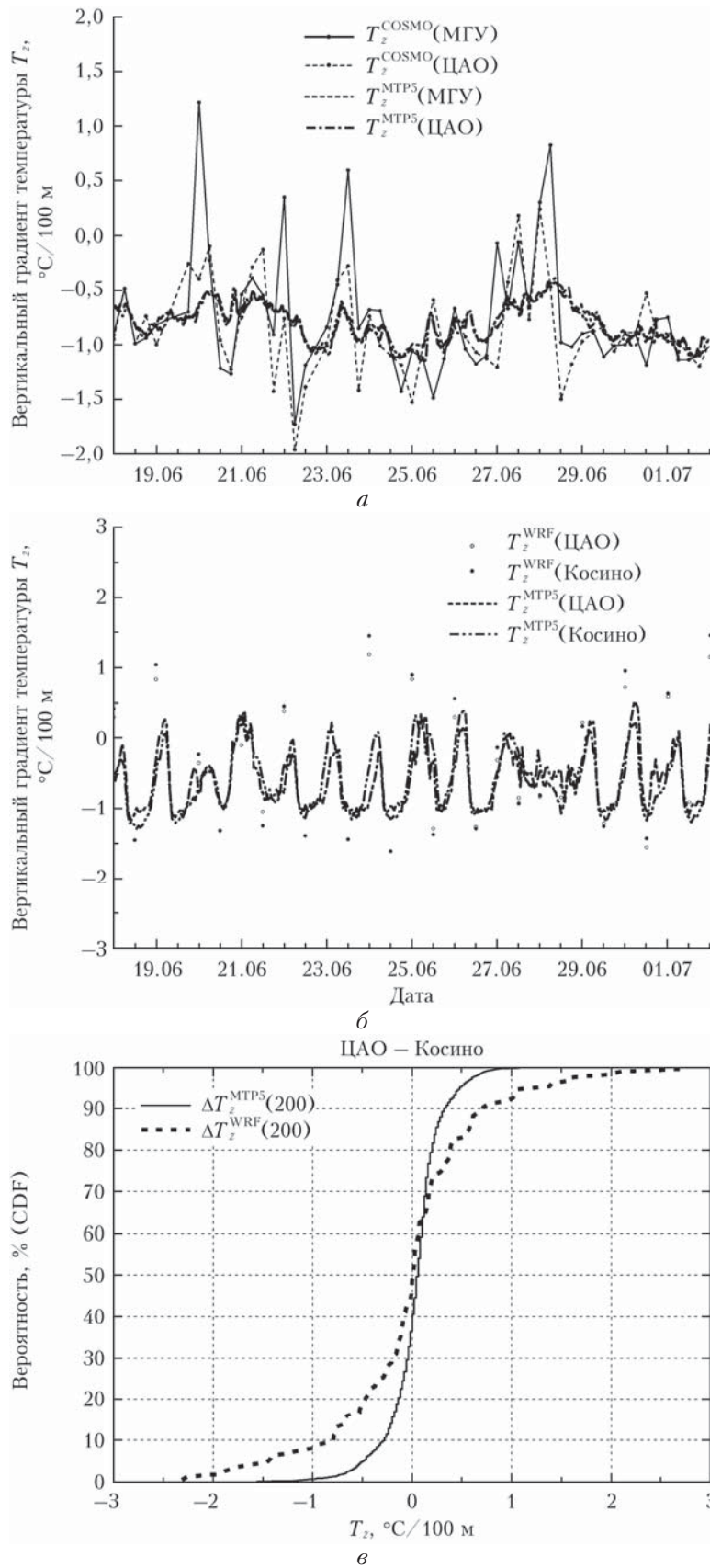
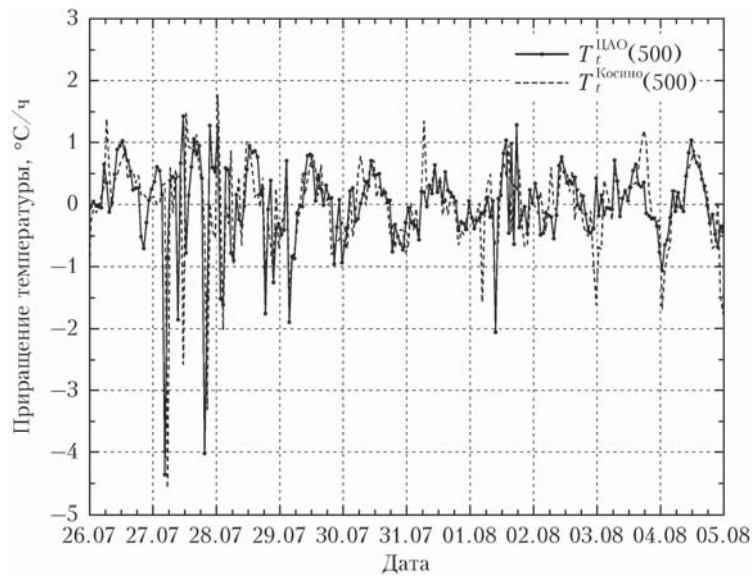
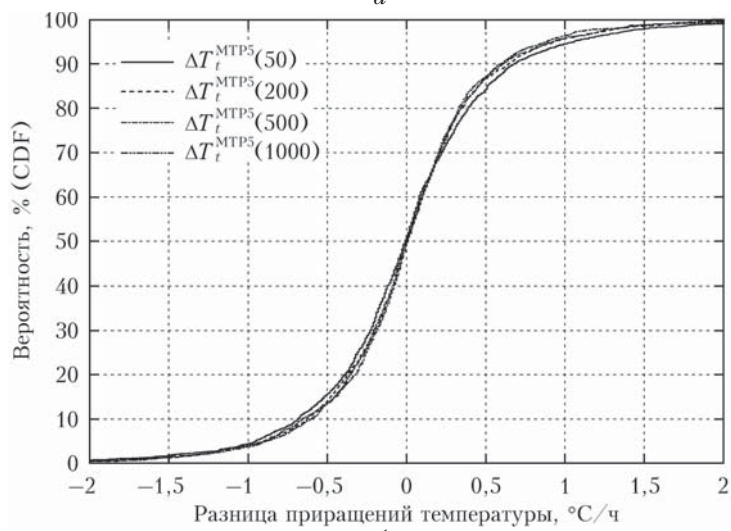


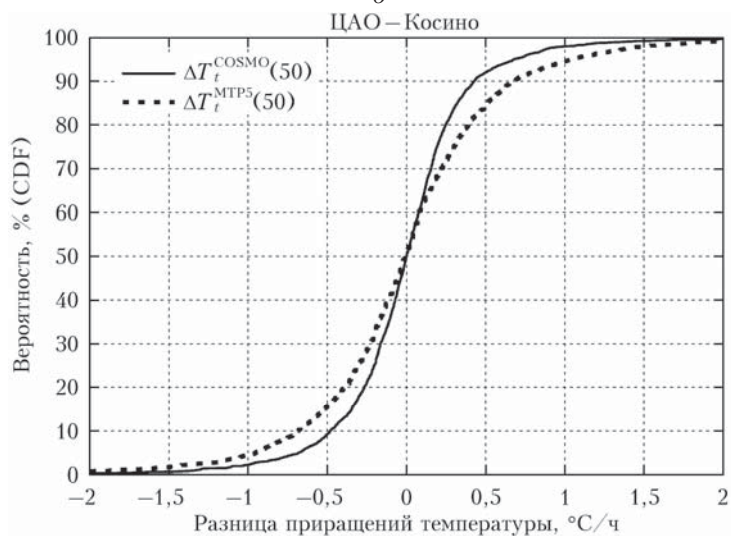
Рис. 4. Временной ход вертикального градиента температуры в двух точках наблюдений и по результатам численного моделирования (COSMO) на высоте 1000 (а); на высоте 200 м в двух других точках и по другой модели (WRF) (б); а также функция распределения разницы вертикальных градиентов в двух этих точках в модели WRF и по данным измерений (в)



а



б



в

Рис. 5. Фрагмент временного хода *временного приращения* температуры в городской и пригородной зоне по данным дистанционных измерений (а); распределение разницы временных приращений на четырех высотах (б); различия распределений этой пространственной разницы по данным численного моделирования (модель COSMO) и измерениям в нижней части АПС (в)

нагрева АПС. Хорошо выделяется суточный ход (в летнее время), а также временная задержка между событиями прохождения синоптических фронтов через территорию мегаполиса и случаи отсутствия такого события в одной точке и присутствия в другой (локальность). Соответственно мезомасштабная модель должна приблизительно правильно описывать эти ситуации и синоптическую «случайность» пространственных неоднородностей.

В отличие от вертикальных градиентов температуры, временные производные «охватывают» весь слой АПС, т.е. распределение временной разницы в двух точках практически не зависит от высоты (рис. 5, б). В моделях пространственная разница временных приращений температуры тоже практически не зависит от высоты. При этом различия модельных распределений меньше, чем распределений данных измерений. Это отличие, очевидно, связано с большей пространственной однородностью модели (ср. рис. 2, в).

Сопоставление распределений разницы временных приращений в двух точках городской среды (рис. 5, в) показывает, что между модельными и измеряемыми распределениями, по крайней мере в нижней части АПС, еще остается надежно фиксируемая разница, которая может быть использована для выбора лучшей модели или схемы параметризации АПС. В целом мезомасштабные синоптические модели, как от них и требуется, хорошо воспроизводят суточную амплитуду временных приращений. При этом временные приращения свободны от стационарной ошибки измерений, т.е. их сравнение «точнее», чем сравнение самих температур.

4. Выводы

Различие между модельными результатами и данными измерений на масштабах мегаполиса требует сопоставлять с ошибками самих измерений, поскольку и те, и другие относительно малы. Важным выводом проведенного анализа является заключение о близости ошибок измерений и пространственной разницы температур на масштабах ГА. Вместо слова «ошибка», имеющего негативный оттенок, правильнее, конечно, использовать термины «неопределенность», «неточность» или «неоднозначность». Так, ошибки измерений содержат неоднозначность процедуры восстановления (при решении обратной задачи), необходимость коррекции по данным других параллельных измерений и разную неточность тех и других, неопределенность в выборе нулевого уровня или высоты слоя вытеснения в городской среде при быстром изменении с высотой характеристик ГА.

С точки зрения статистического анализа временных рядов, ошибки измерений можно разделить на следующие компоненты:

- ошибки отдельных измерений, не коррелирующие друг с другом;
- систематические ошибки, которые можно устранить коррекцией по данным взаимных сопоставлений, например малый сдвиг ориентации приемных антенн акустических локаторов;

— переменные систематические ошибки, природа которых понятна, но значение зависит от синоптической ситуации, скорости и направления ветра и других неконтролируемых причин.

Примером последнего типа ошибок может служить нагревание тела Останкинской башни и возникновение внутреннего пограничного слоя при ее обтекании и конвекции, что значительно влияет на ошибку определения вертикального градиента температуры. Это связано с тем, что тело Останкинской башни слабо влияет на натекающий горизонтальный поток. Для температурных профиломеров причины возникновения ошибок восстановления градиентов термической стратификации также известны. Они связаны с типом стратификации и высотой поднятой инверсии. Статистически эта ошибка оценивалась в экспериментах сравнения [25, 26], но она зависит и от конкретного места установки профиломера [21]. Измерения скорости ветра контактными и дистанционными способами, напротив, достаточно близки (см. рис. 3, а).

С точки зрения вариационного анализа и усвоения данных [27] общие ошибки моделей и измерений можно разделить на три большие компоненты: ошибки наблюдений (observation error), ошибки моделирования (nowcast error) и ошибки масштаба (scale error). Последний тип обусловлен тем, что даже если ошибки измерений и моделирования стремятся к нулю, то между точечными измерениями и сеточными моделями с шагом сетки несколько километров должна оставаться *неопределенность*, связанная с невозможностью описания в модели всех локальных особенностей изучаемой территории. Термин nowcast error введен, чтобы отличать модельные ошибки *прогноза* от ошибок, связанных с неточностью описания пограничного слоя, неверной оценкой скорости диссипации и турбулентных потоков, характеристик подстилающей поверхности. Эти ошибки моделирования АПС слабо влияют на ошибку синоптического прогноза, но важны для других прикладных задач, например задач распространения и рассеяния загрязнений.

Проведенное исследование показало, что распределения пространственных разностей вертикальных градиентов температур и скоростей в моделях данного класса и разниц измеряемых характеристик пока еще далеки от близости «по Колмогорову» (критерию Смирнова—Колмогорова). Возможно, выбор более детальной модели позволит сблизить эти распределения.

Заключение

Проведенный анализ показал, что измерения скорости ветра в разных точках города достаточно хорошо коррелируют на высотах более 200 м лишь после тщательной коррекции ошибок измерений. Модели же недооценивают пространственную изменчивость скорости ветра на таких высотах.

Разница температур между парами точек в сканирующих дистанционных измерениях может содержать коррелирующую по высоте значимую ошибку. Избежать этой погрешности позволяет сравнение

вертикальных градиентов температуры. Модели, использованные для сравнения, сильно переоценивают пространственную изменчивость вертикальных градиентов.

Лучше всего модели воспроизводят временные приращения температуры. Преимуществом временных приращений при сопоставлении с данными наблюдений является то, что они свободны от стационарной ошибки измерений. В модельных распределениях все же остается значимая разность по сравнению с данными измерений, что позволяет сравнивать схемы параметризации между собой и проводить выбор лучшей из них.

Полученные результаты свидетельствуют, что предлагаемая методика *вероятностного сопоставления*, т.е. сопоставления распределений пространственных различий на масштабах мегаполиса между модельными и инструментальными временными рядами на «климатическом» ансамбле синоптических состояний, может быть полезной для оценки качества мезомасштабных моделей. В последние годы появляется много статистических и модельных расчетов городского «острова тепла», в том числе основанных на данных новых методов наблюдений. Однако в моделях «остров тепла» можно симулировать за счет искусственного уменьшения альбедо поверхности или «форсинга» (дополнительного источника тепла). Таких модельных оценок становится все больше с развитием технологий численных расчетов, при этом критерии их точности остаются до сих пор размытыми.

Важной проблемой оценки качества моделей АПС является точность дистанционных измерений. Она близка к точности самих модельных оценок. Предлагаемый метод сопоставления синоптических моделей и наблюдений, по существу, аналогичен широко известной вариационной процедуре усвоения данных, т.е. он учитывает ограниченную точность как моделей, так и наблюдений. Однако этот метод нацелен на улучшение или выбор самой модели, в то время как процедуры усвоения или реанализа предполагают неизменность выбранной модели.

Предлагаемая методика сравнения эмпирических, инструментальных и модельных распределений подобна анализу критерия непараметрического теста Колмогорова–Смирнова или оценки Брайера (BS). К ее достоинствам можно отнести апостериорность (с точки зрения теории) и адаптивность (с точки зрения практического использования). Хотя модели, выбранные для проведенного исследования, пока не обладают достаточной детальностью для описания «острова тепла» Московского мегаполиса и не способны правильно описывать пространственную разницу скорости ветра и температуры в пределах города, полученные результаты демонстрируют возможности методики и те *статистические распределения*, к которым должна стремиться модель городского пограничного слоя, претендующая на описание городской аномалии.

1. *Murphy A.H.* Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient // *Mon. Weather Rev.* 1988. V. 116, N 12. P. 2417–2424.

2. *Stauffer D.R., Seaman N.L.* Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data // *Mon. Weather Rev.* 1990. V. 118, N 6. P. 1250–1277.

3. *Oke T.R.* Boundary layer climates. Routledge, 2002. 460 p.

4. *Chen F., Kusaka H., Tewari M., Bao J.W., Hirakuchi H.* Utilizing the coupled WRF/LSM/Urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the Greater Houston area // *Fifth Sympos. Urban Environ.* 2004. P. 9–11.

5. *Chen Y., Jiang W.M., Zhang N., He X.F., Zhou R.W.* Numerical simulation of the anthropogenic heat effect on urban boundary layer structure // *Theor. Appl. Climatol.* 2009. V. 97, N 1–2. P. 123–134.

6. *Lee S.H., Kim S.W., Angevine W.M., Bianco L., McKeen S.A., Senff C.J., Trainer M., Tucker S.C., Zamora R.J.* Evaluation of urban surface parameterizations in the WRF model using measurements during the Texas Air Quality Study 2006 field campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 5. P. 2127–2143.

7. *Trusilova K., Schubert S., Wouters H., Früh B., Grosman-Clarke S., Demuzere M., Becker P.* The urban land use in the COSMO-CLM model: A comparison of three parameterizations for Berlin // *Meteorol. Z.* 2016. V. 25, N 2. P. 231–244.

8. *Tao W., Liu J., Ban-Weiss G.A., Hauglustaine D.A., Zhang L., Zhang Q., Tao S.* Effects of urban land expansion on the regional meteorology and air quality of eastern China // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 8597–8614.

9. *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. АН.* 2002. Т. 385, № 4. С. 541–548.

10. *НПО АТТЕХ* [Электронный ресурс]. URL: <http://attex.net>

11. *Кузнецов Р.Д.* Акустический локализатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 8. С. 749–753.

12. *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.

13. *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. 25, № 10. С. 877–883.

14. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Мацкевич М.К.* Измерение компонент завихренности в нижнем 300-метровом слое атмосферы // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 1996. Т. 32, № 3. С. 323–328.

15. *Palmer T.N.* Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate // *Rep. Prog. Phys.* 2000. V. 63, N 2. P. 71–116.

16. *Юшков В.П.* Вероятностное описание турбулентных процессов в атмосфере // *Вестн. МГУ. Физика. Астрономия.* 2013. № 4. С. 65–72.

17. *Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D.* Low-level jets in the Moscow region in summer and winter observed with a sodar network // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2012. V. 143, N 1. P. 159–175.

18. *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.

19. Юшков В.П. Синоптические флуктуации скорости ветра в пограничном слое атмосферы // Метеорол. и гидрол. 2012. № 4. С. 17–28.
20. Юшков В.П. Оценка пространственных неоднородностей температурной стратификации в пограничном слое Московского мегаполиса по данным дистанционных измерений // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 11. С. 1012–1022; *Yushkov V.P.* Estimation of spatial inhomogeneities of thermal stratification in the boundary layer of the Moscow megalopolis from remote sensing // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 1. P. 56–66.
21. Юшков В.П. Что может измерять температурный профилемер? // Метеорол. и гидрол. 2014. № 12. С. 76–88.
22. 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.
23. *Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Куницын В.Е., Захаров В.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Ситанский С.И.* Московский остров тепла в блокирующем антициклоне летом 2010 г. // Докл. РАН. 2014. Т. 456, № 5. С. 591–595.
24. *Троицкий А.В.* Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии 5 мм // Изв. вузов. Радиофиз. 1986. Т. 29, № 8. С. 878–888.
25. *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. 34–44.
26. *Crewell S., Löhnert U.* Accuracy of boundary layer temperature profiles // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007. V. 45, N 7. P. 2195–2201.
27. *Tsyrlunikov M.D.* Stochastic modelling of model errors: A simulation study // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2005. V. 131, N 613. P. 3345–3371.

V.P. Yushkov. Remote sensing and mesoscale models in the study of the urban boundary layer.

It is shown how ground-based remote sensing can help us to improve the knowledge of atmospheric boundary layer and how mesoscale synoptic models can be used as a hindcasting tool. A technique is suggested for evaluation of the quality of boundary layer representation in the models using remote sensing data.