УДК 551.524.3

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА МЕГАПОЛИСА: СОПОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2022 г. В. П. Юшков*

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 2, Москва, 119991 Россия *e-mail: yushkov@phys.msu.ru Поступила в редакцию 15.12.2021 г. После доработки 19.01.2022 г. Принята к публикации 09.02.2022 г.

Проведено сопоставление длительных систематических измерений термической стратификации в атмосферном пограничном слое Московского мегаполиса и численных расчетов на мезомасштабной модели высокого пространственного разрешения. Численные модели демонстрируют более устойчивую, чем в наблюдениях, стратификацию в ночные часы в зимний период. При неустойчивой стратификации, в том числе в зимнее время, модели слишком быстро гасят возникающие неоднородности, что приводит к недооценке спектра мезомасштабных флуктуаций, средних градиентов и их динамики в моделях в нижней части АПС. Предложен простой алгоритм оценки ошибок численных моделей и показано, что ошибки прогноза приземной температуры в значительной степени связаны именно с моделированием процессов в пограничном слое. Показано, что температурные радиометры, работающие в полосе 60 ГГц, могут стать простым и надежным средством оценки точности параметризаций пограничного слоя в численных моделях прогноза погоды.

Ключевые слова: пограничный слой, термическая стратификация, температурный профилемер, мезомасштабное моделирование, московский мегаполис, систематические ошибки

DOI: 10.31857/S0002351522030129

введение

Численные модели гидродинамического прогноза погоды, такие как WRF [1], COSMO [2], ICON [3] и многие другие, в последние десятилетия становятся доступны для все более широкого круга исследований, а сопоставление численных прогнозов на этих моделях с результатами современных дистанционных измерений становится возможным для все более широкого круга специалистов. Модели становятся все более детальными, допускают множество параметризаций микрофизических и турбулентных процессов, поэтому вопрос о точности и эффективности детальных прогнозов погоды с появлением новых методов измерений приобретает новые грани: становится возможным оценивать не только точность воспроизведения поля давления или геопотенциала, но и температурную стратификацию пограничного слоя, интенсивность турбулентного перемешивания, или, например, влагосодержания облаков и распределение в них капель и кристаллов [4–6].

С ростом численности городского населения, площади и изменением характера застройки больших городов актуальным становится вопрос о способности современных гидродинамических моделей с высоким пространственным разрешением правильно описывать то влияние, которое оказывает человек на окружающую его природу. Хорошо известно, что термическая стратификация атмосферного пограничного слоя (АПС) определяет перемешивание в нем [7, 8] и влияет на концентрацию атмосферных загрязнений в крупных мегаполисах [9]. А правильное воспроизведение термической стратификации пограничного слоя в численных моделях, в его нижней части и непосредственно вблизи поверхности, учет мезомасштабной неоднородности свойств подстилающей поверхности, ведут к совершенствованию как моделей, так и нашего представления о процессах турбулентного перемешивания.

В настоящей работе проведено сопоставление долговременных дистанционных измерений вертикальных профилей температуры в АПС, получаемых с помощью сканирующего микроволнового (СВЧ) радиометра МТР-5 с модельными расчетами на детальной мезомасштабной модели атмосферной циркуляции WRF-ARW. Такой анализ может быть рекомендован и для других моделей, схем параметризаций, или других методов восстановления профилей температуры по дистанционным измерениям.

1. ГОРОДСКОЙ ОСТРОВ ТЕПЛА И ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Воздействие человека на окружающую среду многообразно и поле температуры является лишь наиболее простым индикатором такого воздействия. Надежность измерения даже малых вариаций поля температуры позволяет тестировать гидродинамические модели атмосферных течений и оценивать надежность моделей переноса, что важно, например, при расчетах концентраций загрязняющих примесей. Одновременно, термическая стратификация АПС определяет характеристики турбулентного перемешивания и вертикальный поток тепла, импульса, влаги, газовых примесей.

Многочисленные измерения в городской среде и загородной местности [10-12] показывают характерную картину изменения поля температуры, которая зависит от географического положения мегаполиса, времени года, дня и высоты над поверхностью. Например, хорошо известно, что городской остров тепла (UHI) по измерениям на метеостаншиях и измеряемое со спутников поле ИК излучения поверхности (SUHI) существенно отличаются как по суточному ходу, так и по интенсивности [13–15], а в аридном климате растительность городских поселений приводит даже к формированию "островов холода" [16]. Однако, измерения со спутников не позволяют измерять вертикальную протяженность острова тепла или холода, оценивать влияние города на весь воздушный бассейн, а в численных моделях вертикальная протяженность острова тепла зависит от используемых параметризаций. И насколько адекватно описывают модели городской пограничный слой можно измерить с помощью регулярного дистанционного зондирования с поверхности.

Такие измерения, на высотах в сотни метров над поверхностью, требуют специальных инструментов. СВЧ радиометрия пограничного слоя, принципы и закономерности которой сформулированы еще в середине прошлого века [17] стала надежным средством таких регулярных измерений [18–20]. Другие методы: аэрологическое зондирование, измерения на высотных мачтах, с использованием автономных летательных аппаратов, обладают широким спектром проблем: редкость измерений в суточном цикле, сложность установки и влияние тела мачты в контактных измерениях температуры в непосредственной близости от нее, сложность и затратность непрерывного мониторинга при организации взлета и посадки дронов и т.д.

И хотя радиометрические измерения также имеют систематические ошибки в восстановле-

нии профилей температуры, их можно в значительной степени уменьшить при оценке средней термической стратификации, то есть разницы температур по вертикали. Принципиальным ограничением точности измерений радиометром является использование приближения горизонтальной однородности поля температуры и его стационарности на масштабе измерения. По этой причине пространственные или быстрые турбулентные вариации поля температуры приводят к ошибкам восстановления его вертикального профиля. Эти ошибки очевидны при сопоставлении с контактными измерениями на привязных аэростатах или летательных аппаратах. Еще одну значимую ошибку, зависящую от способа проведения измерений и места размещения прибора, а также синоптической ситуации, дает способ установки контрольного датчика температуры микроволнового радиометра [21].

Характерное значение общей ошибки измерений можно оценить сопоставляя вертикальные Т_г и горизонтальные T_x градиенты температуры. Если предел точности для температурного профилемера можно оценить как 1°С/км, то синоптическая неоднородность T_x составляет порядка 1°С/100 км (см. рис. 2) то есть на два порядка меньше. В тоже время, пространственные неоднородности температуры с масштабом $T_x = 1^{\circ} C/\kappa M$, вполне возможные и наблюдаемые в городской среде, не могут быть измерены и восстановлены данным прибором и требуют специальной, более сложной, метолики измерений. Другими словами, температурный СВЧ профилемер является высокотехнологичных и надежным средством измерения термической стратификации АПС на масштабах времени 10-15 мин, усредненной по пространственному масштабу в несколько километров, без высокочастотных и пространственных вариаций. Однако и численные синоптические модели не предполагают описания таких вариаций.

Но хотя СВЧ радиометрия и дает надежное измерение средней термической стратификации АПС, она, конечно, не позволяет прогнозировать ее изменение и не дает пространственной картины поля температуры над мегаполисом, изменение которого связано с синоптической ситуацией, скоростью и направлением ветра. Дают ли численные модели адекватное описание поля температурной стратификации над городом и будет рассмотрено в настоящей работе.

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ И ТОЧКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В сотрудничестве с Гидрометцентром России на физическом факультете МГУ параллельно с ди-

станционными измерениями термической стратификации уже несколько лет проводятся расчеты на региональной мезомасштабной модели WRF с разрешением по горизонтали 2 км и увеличенным числом вертикальных уровней в пограничном слое [22]. Для проведения настоящего исследования использовалась модель WRF с динамическим ядром ARW в версиях 3.8-3.9 [23, 24]. В качестве начальных и граничных условий использовались результаты расчетов по глобальной прогностической модели GFS [25] с пространственным разрешением 0.5°. Для получения высокого пространственного разрешения модель считалась на трех вложенных сетках: 18, 6 и 2 км, с односторонней передачей граничных условий. Московский мегаполис располагался в центре каждого домена (см. рис. 2). Каждая сетка имела 100 узлов по двум горизонтальным направлениям в проекции Ламберта и 31 уровень по вертикали (до 50 гПа) со сгущением в пограничном слое.

Для сопоставления с данными измерений использовались результаты численных расчетов со следующими параметризациями: микрофизика облаков – по работе Томпсона [26], длинноволновая и коротковолновая радиация – RRTMG [27], модель процессов в почве — Noah [28]. Для сетки с разрешением 18 км использовалась параметризация конвекции по схеме Грела [29]. Для описания перемешивания в пограничном слое на мезомасштабах использовалась схема, предложенная Бужо и Лакаре [30], построенная на решении уравнения для турбулентной кинетической энергии (ТКЕ). В ней, для описания потока тепла в конвективном пограничном слое, дополнительно вводится противоградиентный член [31]. Масштаб длины в этой схеме определяется как расстояние, на которое может переместиться ансамбль воздушных частиц с заданным значением TKE [30].

На сетках с разрешением 18 и 6 км отдельной параметризации городского слоя не использовалось. В них влияния города описывалась только заданием параметров подстилающей поверхности в городских точках (шероховатость, альбедо, теплоемкость и теплопроводность почвы). На сетке с разрешением 2 км использовалась одноуровневая модель городского приземного слоя (SLUCM. [32]). В ней задается дополнительный источник тепла, которым является город, а также учитывается эффект от затенения и отражения в каньонах улиц. Средний антропогенный поток тепла задавался в 20, 50 и 90 BT/M^2 в зависимости от преобладающего типа застройки в каждой городской ячейке сетки (Low intensity, High intensity, Industrial).

Заложенные в модель параметризации были подобраны таким образом, чтобы результаты расчетов наилучшим образом соответствовали данным измерений профилей температуры и скорости ветра в Московском регионе [22]. Расчеты могут быть проведены и для иных схем параметризаций или с изменением расчетной сетки, но, как представляется, это не существенно изменит результаты работы.

В настоящей работе основное внимание уделено сравнению измерений в МГУ. на юго-западе столицы и в Звенигороде, в 50 км от центра города. Условия наблюдений в Звенигороде соответствуют загородной местности и могут считаться "контрольными" при изучении московского городского острова тепла [33]. Профилемер МТР-5 установлен здесь на Звенигородской научной станции института физики атмосферы (ЗНС ИФА РАН, обозначение ЗНС, 55°41'44.14" N 36°46'32.18" Е). Высота установки профилемера над поверхностью – 15 м. В МГУ профилемер установлен на крыше здания физического факультета. Координаты точки измерения – 55°42′00.28″ N, 37°31′45.30″ Е, высота установки – 40 м от поверхности. И хотя эта точка, расположена не в самом центре Москвы, а на возвышенности Воробьевых гор, поле температуры над этой местностью характерно для современной городской среды. В этих двух точках используются температурные СВЧ профилемеры МТР-5 с высотой зондирования до 600 м, работающие в центре полосы поглощения кислорода 5 мм [34].

При содействии Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) Росгидромета, ФГУП "Мосэкомониторинг" и ИФА РАН им. Обухова измерения в этих точках сопоставлялись с измерениями в центре Москвы и на восточной окраине мегаполиса. В центре Москвы, в районе Якиманка, профилемер установлен на крыше здания Института физики атмосферы, координаты точки измерений – 55°44′20.81″ N 37°37'23.57″ Е, высота над поверхностью – 13 м, обозначение – ИФА. На восточной окраине Москвы еще один прибор установлен в районе Косино, 55°43'3.09" N 37°56'13.20" Е, высота расположения прибора над поверхностью – 4 м. В этих двух точках установлены профилемеры новой модификации, работающие "на склоне" полосы излучения, то есть обладающие большей чувствительностью к вариациям температуры на больших высотах, с высотой зондирования до 1000 м.

Еще одна точка измерений где проводятся регулярные наблюдения вертикальных профилей температуры расположена на севере столицы, в ЦАО (координаты 55°55'30.43" N 37°31'24.26" Е, высота установки – 20 м от поверхности). Эти измерения проводятся уже многие годы при участии разработчиков прибора и контролируются запуском аэрозондов в непосредственной близости от точки измерений. Данные этих измерений, как и измерений в Останкино, вблизи Останкин-



Рис. 1. Эпизод временного хода температур в двух точках городской (МГУ) и загородной (ЗНС) местности по данным наблюдений (МТР-5) и численного моделирования (WRF) в нижней (25 м) и верхней (575 м) частях АПС. Март 2021 года.

ской телебашни (координаты 55°49'16.39" N 37°36'45.04" Е), также анализировались, но не описаны в настоящей работе. Сопоставление данных наблюдений во всех точках показало, что приборы и первой и второй модификации надежно отслеживают особенности температурного поля в городской среде, а вертикальные профили демонстрируют их общие свойства (см. рис. 7). Расположение точек измерений можно видеть на рис. 2.

3. ИЗМЕРЯЕМЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ И ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ. ОШИБКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРАТИФИКАЦИИ

Для изучения качества восстановления в моделях температурной стратификации в АПС в настоящем исследовании мы выбрали небольшой диапазон заблаговременностей численных прогнозов: 3–27 ч. Такое ограничение позволяет считать, что ошибки прогноза текущей синоптической ситуации и ошибки моделирования процессов в пограничном слое имеют примерно один порядок (см. рис. 1). А запуск модели лишь раз в сутки (но в течение многих лет) экономит расчетные ресурсы и позволяет делать акцент не на точности прогноза погоды, а на свойствах модельных полей с высоким пространственным разрешением в разных синоптических условиях.

Этот квазинепрерывный ряд прогнозов с часовым временным шагом можно затем сопоставлять с регулярными измерениями временных рядов (температуры, скорости ветра, характеристик турбулентности) в точках наблюдений и, одновременно, такие численные расчеты позволяют анализировать пространственную картину неоднородности модельных полей (см. рис. 2), которую невозможно понять лишь по локальным измерениям.

Поведение пространственных неоднородностей поля температуры в модельных расчетах позволяет утверждать, что вертикальные градиенты (термическая стратификация) или разница температур в верхней части АПС и в его нижней части точнее характеризуют динамику острова тепла чем разница приземных измерений на метеостанциях. Этот же вывод подтверждается сопоставлением пространственно разнесенных синхронных измерений профилей температуры в МГУ и Звенигороде (см. рис. 1а).

Как показано на рис. 1а, на примере одного эпизода, значительная разница температур между городской и загородной местностью (остров тепла) наблюдается относительно редко. При отсутствии значительного суточного хода радиационного выхолаживания и нагревания, и в "средних" условиях турбулентного перемешивания при сплошной слоистой облачности в холодный период года, разница температур между городской и загородной местностью составляет всего около 1 градуса, достигая 6 градусов лишь в исключительных случаях сильных инверсий при слабой облачности с малой скоростью ветра (см. рис. 6). В дневные часы приповерхностный остров тепла почти не выражен (см. также [33]).

В целом, как видно на рис. 1в, численные модели на малом интервале заблаговременности достаточно успешны, поскольку начальные условия в этом случае соответствуют усвоенным данным наблюдений. А скачки температуры между прогнозами с заблаговременностью 3 и 27 ч на рис. 1в являются удобной мерой ошибок и расхождения численных прогнозов (см. ниже рис. 3). В тоже время, как видно, численный прогноз не вполне точно воспроизводит разницу температур между



Рис. 2. Модельные поля температур на разных высотах над поверхностью в эпизоде сильной инверсии 11 марта 2021 года (06 часов LST, см.рис. 1), показаны границы московского мегаполиса и точки расположения СВЧ профилемеров.



Рис. 3. Распределение разницы температур в численных прогнозах с заблаговременностями 3 и 27 часов в приземном слое и в верхней части АПС в городской (МГУ) и загородной (ЗНС) местности в зимний (DJF) и летний (JJA) сезоны. Аппроксимация нормальным распределением (fit) показывает смещение (b – bias) и среднеквадратичное отклонение ошибок (r – rms) в градусах.

уровнями 600 и 0 м: минимум достигается в другие дни, а максимумы не столь явно выражены как в наблюдениях. Причину этих ошибок мы и будем искать в дальнейшем.

Само поле температуры в момент максимума инверсии 11 марта 2021 г. показано на рис. 2. Хорошо видно две особенности этого поля: остров тепла вблизи поверхности над Москвой и слабость пространственных вариаций температуры на высотах около 600 м. Понятно, что модельная разница температур $T_0 - T_{600}$ будет характеризовать городской остров тепла независимо от ошибок прогноза динамики воздушной массы и сопоставление этой разницы в модельных данных и в измерениях позволяет лучше судить о параметризациях турбулентного перемешивания в АПС в разных моделях.

Отметим еще, что пространственная неоднородность поля температуры, хорошо видная на рис. 2, которая зависит и от орографии местности, и от скорости и направления ветра, статистически характеризует анизотропную турбулентность мезомасштабных флуктуаций и может, в дальнейшем, стать источником информации о турбулентном перемешивании в АПС.

4. ОШИБКИ ПРОГНОЗА И ИХ СВЯЗЬ С ОШИБКАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Численные прогнозы с разной заблаговременностью, конечно, обладают различной точностью. Поэтому разница модельных полей температуры между прогнозами, например, с заблаговременностью 3 и 27 ч содержит важную информацию о свойствах численной модели: построив статистическое распределение этой разницы на разных высотах, в разное время года и в разных точках мы получаем информацию о том где ошибки прогноза больше, какова их смещенность (систематическая ошибка), связаны ли эти ошибки с параметризацией процессов в пограничном слое или свойствами подстилающей поверхности.

Статистический анализ таких ошибок достаточно прост и он показал, что именно моделирование пограничного слоя и процессов на поверхности вносит основной вклад в смещенность прогнозов. На рис. 3 показаны эмпирические распределения разности прогнозов температуры в точках наблюдений, с заблаговременностью 3 и 27 ч (T_3-T_{27}) вместе с их аппроксимацией нормальным распределением ("fit"), чтобы была видна разница средних и дисперсий, а также достаточность нормальной аппроксимации, в большинстве случаев, для этих ошибок.

Хорошо видно что именно ошибки прогнозов температуры вблизи поверхности, на первом модельном уровне, больше смещены и имеют больший разброс (СКО). Для аппроксимирующих кривых нормального распределения на рис. 3 показаны смещение (по медиане) и СКО. Хотя разница модельных ошибок в городской среде и загородной местности заметна, она все же невелика, что может свидетельствовать о том, что влияние подстилающей поверхности на пограничный слой описывается недостаточно детально или мало влияет на распределение ошибок. Другими словами, изменение модели или параметризации в ней пограничного слоя можно оценить по тому, на-

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 4 2022



Рис. 4. Характер суточного хода средних температурных градиентов в АПС (0–600 м) в загородной местности (3HC), а также в его нижней (0–200 м) и верхней (400–600 м) частях летом (а, вверху), осенью (б, в середине) и зимой (в, внизу).

сколько эта параметризация уменьшает смещенность прогноза на 24 ч.

Еще один вывод, который вытекает из анализа таких ошибок, — смещение больше в летнее время, когда устойчивая стратификация АПС регулярно наблюдается в ночные часы, а ее прогноз затруднен из-за ошибок описания подсеточных турбулентных процессов.

5. ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ И В РАЗНОЕ ВРЕМЯ ГОДА

Важной характеристикой острова тепла является его высотная протяженность и ее изменчивость. Профили температурной стратификации поэтому являются детальной характеристикой поля температуры в АПС. Но конечно, методики сопоставления данных измерений и численных расчетов могут быть выбраны различным образом. В настоящей работе мы ограничили себя наиболее очевидными выводами. По результатам предварительного анализа было выбрано три диапазона высот удобных для сопоставления с расчетной и методической точек зрения: в нижней части АПС, между уровнями 0 и 200 м, в верхней части – 600–400 м и во всем диапазоне высот который охвачен измерениями – 0–600 м.

На рис. 4 для сопоставления стратификации в разных диапазонах высот разница между уровнями приведена к среднему вертикальному градиенту на 100 м. В таком случае эту разницу удобнее сопоставлять с сухоадиабатическим градиентом и со средним градиентом температуры во всем АПС. Видно, что в летние месяцы междусуточные вариации температурной стратификации больше в ночные часы. В дневные же часы температурная стратификация вблизи поверхности становится сверхадиабатической со значительными вариациями (перемежаемостью стратификации) на масштабах времени в десятки минут (ср. рис. 7).

В зимние месяцы, в условиях сплошной слоистой облачности, и днем и ночью стратификация остается слабоустойчивой (от 0 до 1°С/100 м), причем вблизи поверхности ее теплоотдачи часто достаточно, чтобы обеспечить стратификацию близкую к нейтральной. В ясные дни антициклонической погоды устойчивая стратификация (инверсия температуры) также характерны для всего дня и охватывают весь пограничный слой.

2022



Рис. 5. Временной ход разницы температур (аналогично рис. 46) в городской местности (МГУ) и по данным численного моделирования в двух точках измерений.

В переходный период, осенью и ранней весной, ясные безоблачные дни с сильным суточным ходом радиационного баланса особенно наглядно показывают связь разницы температурной стратификации в мегаполисе (см. рис. 5а) и загородной местности (рис. 4б) с синоптическими условиями.

Важный практический вывод, который следует из анализа рис. 4 и 5: наблюдаемое изменение температурной стратификации в городской среде достаточно сложно сопоставлять с модельными расчетами на длительном временном интервале, поскольку суточный временной ход стратификации постоянно меняется по амплитуде, так как зависит от синоптических условий. И ошибки модельного описания термической стратификации не будут ни стационарным случайным процессом, ни независимыми случайными величинами.

Поэтому использование некоторого параметра, например аналогичного масштабу Монина— Обухова: $L_B^{-1} = gT/T_0U^2$ или числу Ричардсона $Ri_B = z/L_B$, где, скажем, для высоты z = 200 м U — скорость ветра на этой высоте, а $T = T_{200} - T_0 -$ разница температур, является естественным критерием или способом сопоставления данных натурных измерений и модельных прогнозов.

6. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ И ЕЕ РАЗНИЦА В ГОРОДСКОЙ И ЗАГОРОДНОЙ МЕСТНОСТЯХ

Чтобы сопоставить разницу термической стратификации при различных метеоусловиях и в разных точках, продемонстрировать особенности динамики острова тепла и воспроизведение термической стратификации в моделях, и чтобы различия связанные с ясной и облачной погодой были видны контрастнее, мы выбрали, для примера, октябрь 2018 г.

На рис. 5а показан временной ход температурной стратификации по измерениям в городской среде. Хорошо видно, что различия в термической стратификации в городской и загородной

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 4 2022

ЮШКОВ



Рис. 6. Временной ход разницы радиояркостных температур, измеряемых СВЧ профилемером под разными углами в загородной (ЗНС, вверху) и городской (МГУ, внизу) местности в зимнее и летнее время, как пример радиояркостных контрастов и чуствительности измерений к изменению термической стратификации.

местностях (см. рис. 4б) особенно сильно проявляются при ясной погоде и сильном суточном ходе радиационного баланса. Отметим, что сопоставление временных рядов стратификации в летние и зимние месяцы, за несколько лет наблюдений (см. также рис. 6) в большой степени подтверждают этот вывод, хотя в значительной степени он известен и по результатам других многочисленных сопоставлений [11, 12]. Однако в численных моделях, как видно на рис. 56 и 5в, разница термической стратификации в толщине пограничного слоя почти незаметна.

Эта разница температурной стратификации в нижней части пограничного слоя в городской и загородной местности (ср. рис. 4 и 5) должна отличаться примерно в два раза в максимуме устойчивости: если в загородной местности прогнозируется устойчивая стратификация с градиентом 4°C/100 м, то в городской среде она будет около 2°C/100 м. Пока же разница градиентов температуры в городской и загородной местности по модельным расчетам составляет около 10-15% и теряется на фоне ошибок прогнозов.

Конечно, различия временного хода температурной стратификации в городской и загородной местности должны правильно описываться моделями. Однако, если нет возможности исправить модель, эти систематические ошибки прогнозов можно корректировать. И если ошибки модельных полей температуры в АПС зависят от значения стратификации или от числа Ричардсона, построение эмпирических "корректирующих таблиц" или аппроксимирующих их эмпирических функций может быть полезным.

В целом можно сделать два заключения. Вопервых, улучшение численных моделей и параметризаций городского пограничного слоя можно сравнивать по успешности описания ими вариаций термической стратификации АПС в городской и загородной местности. Во-вторых, оценка изменения термической стратификации в АПС через разницу средних вертикальных градиентов температуры является простым и удобным средством измерения интенсивности городского острова тепла, менее чувствительной к пространственным неоднородностям поля температуры синоптического масштаба.

7. СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ "ОПЕРАТОРА НАБЛЮДЕНИЯ"

Как отмечалось, процедура восстановления профилей температуры сканирующим СВЧ радиометром предполагает слоистую однородность изучаемой среды, что естественно нарушается в городских каньонах [12]. Кроме того, были сомнения в возможной роли ошибок, связанных с измерением абсолютного значения температуры внешним контрольным датчиком, локальный перегрев которого в точке измерений приводит к смещению всего профиля, а подогрев от здания где установлены приборы наблюдения, в ночные часы, мог бы, гипотетически, изменять профили температуры. Поэтому полученные выводы были проверены косвенными методами.

От ошибок восстановления профилей температуры свободны измерения радиояркостных температур, непосредственно измеряемых радиометром под различными углами. Иначе говоря, сопоставление радиояркостных контрастов измерений в зенит и в горизонт, а также под другими углами, с такими же разностями, измеряемыми в городской и загородной местности, или в разных точках городской среды, дает уверенность в значимости измеренных различий, хотя и не позволяет оценивать изменение термической стратификации напрямую.

На рис. 6 показаны сопоставления радиояркостных контрастов температур, измеряемых под углами 90 и 0 градусов (в зенит и в горизонт), 90 – 30, и 15 – 0. Сопоставление последних двух разностей показывает в какой степени разница радиояркостных температур на малых возвышениях дает вклад в общий контраст или насколько сильно изменение устойчивой стратификации в нижней части АПС в городской среде влияет на общий контраст температур.

Как видно, изменение в городской среде температурной стратификации АПС четко прослеживается при инверсиях. В летнее время — в ночные часы, зимой — при антициклонических условиях и радиационном выхолаживании поверхности. Другими словами, радиометрические измерения городского острова тепла весьма надежны и могут служить основой для настройки моделей и параметризаций пограничного слоя.

Усвоение данных дистанционного зондирования в последние десятилетия переходит от традиционных методов усвоения ошибок расчетных полей к усвоению интегральных характеристик от этих полей, непосредственно измеряемых приборами дистанционного зондирования со спутников или с поверхности земли. Для этой цели вводится формальное понятие "оператора наблюдения", который характеризует интегрирующие свойства прибора измерения. В этой связи, контрасты радиояркостных температур, которые могут быть получены из модельных полей температур и давлений путем решения "прямой задачи" распространения СВЧ излучения в АПС представляют еще один удобный инструмент сопоставления различных параметризаций пограничного слоя.

8. ЛОКАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ И ОБЩИЕ ЧЕРТЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАДИЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В РАЗНЫХ ТОЧКАХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ И ЗАГОРОДНОЙ МЕСТНОСТИ

Сложным вопросом при проведении высокотехнологичных и технически затратных измерений является вопрос о возможности обобщения результатов полученных по измерениям в конкретном пункте наблюдений, на характеристики АПС мегаполиса в целом и об общих чертах тех особенностей, которые были найдены по измерениям в двух точках. Локальные особенности измерений в приповерхностном слое на городских метеостанциях хорошо известны [35, 36]. Для Москвы, например, локальные особенности метеорологических измерений особенно заметны на метеостанции Балчуг, расположенной в самом центре столицы [37]. Поэтому проведение дистанционных измерений поля температуры над городом несколькими приборами, установленными в разных точках, измерения на которых проводятся достаточно длительное время (в течение года или более), дают надежную информацию о пространственной однородности острова тепла в городских условиях и его средней амплитуде.

Для такого сопоставления мы выбрали июль 2017 г. и использовали данные измерений в ИФА РАН и ФГУП "Мосэкомониторинг". Высокие суточные контрасты в летнее время и сопоставление разницы температур в нижней части АПС дают достаточное представление о надежности радиометрических измерений и о повторяемости (однородности) в пределах городской среды свойств термической стратификации.

На рис. 7 сопоставляются измерения в центре Москвы (ИФА) и на Воробьевых горах (МГУ), а также в Звенигороде (ЗНС ИФА РАН) и в районе Косино (мусоросжигательный завод № 4) за границами городской среды. Эти совместные измерения показывают, что температурная стратифи-



Рис. 7. Сопоставление измерений средних вертикальных градиентов (250–50 м) в двух точках городской (МГУ и ИФА, вверху) и загородной (ЗНС и Косино) местностях. Июль 2017 г.

кация в городской среде значимо отличается от стратификации в загородной местности в ночное время радиационного выхолаживания и слабо при конвективном перемешивании. Конвективное же перемешивание по вертикали в дневные часы объединяется еще и с горизонтальным (адвективным) переносом, что уменьшает пространственные контрасты температуры.

Как видно, особенности термической стратификации в городской среде хорошо проявляются даже несмотря на то что в разных точках использовались приборы разных модификаций, и что эти приборы были установлены на разной высоте над поверхностью, а контрольные датчики температуры могли различным образом реагировать на влияние зданий и конструкций на которых они расположены. В загородной местности мы видим одинаковое поведение температурной стратификации даже несмотря на значительное расстояние между точками измерений: в Звенигороде, в 50 км к западу от Москвы, и в Косино, на восточной окраине Московского мегаполиса.

Еще один вывод, который следует подчеркнуть: численные модели в своих параметризациях резко ограничивают конвективные мезомасштабные вариации термической стратификации (см.рис. 56 и 5в), то есть не позволяют развиваться пространственным неоднородностям и конвективным неустойчивостям, в том числе, в городской среде. А это, в свою очередь, приводит к недооценке турбулентного обмена и мезомасштабной циркуляции, и, например, при малых скоростях ветра, к избыточному накоплению загрязняющих веществ в воздушном бассейне мегаполисов по модельным расчетам, которое, однако, не наблюдается в действительности [38]. Конечно, это не говорит о чистоте воздушного бассейна Москвы, но характеризует систематические ошибки численного моделирования атмосферного переноса загрязняющих примесей. А систематические ошибки прогноза поля температуры вблизи поверхности, показанные на рис. 3, на это явно указывают.

9. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал, что сканирующие температурные СВЧ радиометры, работающие в полосе 60 ГГц, такие как МТР-5, являются надежным средством измерения средней термической стратификации пограничного слоя. Сеть таких радиометров в Московском регионе демонстрирует многолетнюю синхронную работу в городской среде и в загородной местности. И эти радиометры могут стать простым и надежным средством оценки параметризаций пограничного слоя в численных моделях городской среды высокого пространственного разрешения.

Временной ход термической стратификации АПС обладает удобным свойством: он в значительной степени стационарен, а синоптическая ситуация меняет, главным образом, амплитуду суточных вариаций. Это свойство позволяет сравнивать временной ход в разных точках наблюдений, на разных высотах, сопоставлять по этому параметру различные параметризации в моделях.

Сопоставление временного хода термической стратификации АПС в мезомасштабной модели WRF и по данным радиометрических измерений в Московском мегаполисе и его окрестностях показывает, что хотя детальные мезомасштабные модели, такие как WRF, в целом правильно воспроизводят изменение термической стратификации АПС в суточном ходе, изменения стратификации обусловленные влиянием городской среды в современных моделях практически незаметны. В отличие от данных микроволновых измерений, которые показывают значимые и воспроизводимые в разных точках мегаполиса особенности.

Систематической ошибкой численных мезомасштабных моделей является воспроизведение значимых инверсий температуры в городской среде в ночные часы в зимний период при их отсутствии в данных измерений. Такие ошибки могут быть связаны с неточным расчетом радиационного баланса пограничного слоя при сплошной слоистой облачности. А в условиях неустойчивой стратификации, в том числе в зимнее время, модели слишком быстро гасят неустойчивости возникающие при градиентах температуры больше адиабатического, что приводит к недооценке этих градиентов и их динамики в нижней части АПС (0– 200 м) в моделях.

Предложен простой алгоритм оценки численных ошибок моделей как разницы сверхкраткосрочных (3 ч) и суточных (27 ч) прогнозов. Статистическая оценка этих ошибок показала, что в модели они практически не отличаются в городской и загородной местности, но систематически значимы именно вблизи поверхности, особенно в летний период. Другими словами, ошибки прогноза приземной температуры воздуха в значительной степени связаны именно с воспроизведением процессов перемешивания в пограничном слое атмосферы.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает глубокую признательность всем коллегам за помощь в проведении измерений, без которых эта работа не могла быть сделана. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ 21-1700210 и РФФИ №№ 19-05-00028, 19-05-00375, а также Госзадания по теме FMWZ-2022-0003. Особую благодарность автор хотел бы выразить рецензентам за тщательное прочтение рукописи и значительное улучшение текста работы, а также членам редколлегии за помощь в подготовке текста работы к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model.
- 2. https://www.cosmo-model.org.
- 3. https://code.mpimet.mpg.de/projects/iconpublic.
- Wen X., Lu S., Jin J. Integrating remote sensing data with WRF for improved simulations of oasis effects on local weather processes over an arid region in northwestern China. J. Hydrometeorology. 2012. T. 13. № 2. C. 573–587. https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05001.1

 Zhang C., Wang Y., Hamilton K. Improved representation of boundary layer clouds over the southeast Pacific in ARW-WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme. Monthly Weather Review. 2011. V. 139. № 11. P. 3489–3513. https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05091.1

- Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V. Forecasting mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data // Russ. Meteorol. Hydrol. 2017. V. 42. P. 9–18. https://doi.org/10.3103/S1068373917010022
- 7. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика, ч. 1 и 2. М.: Наука, 1965–1967.
- 8. *Landsberg H.E.* The urban climate. Academic press, 1981.
- 9. *World Health Organization et al.* Urban air pollution in megacities of the world. Oxford: Blackwell, 1992.
- Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly J. Royal Meteorological Society. 1982. V. 108. № 455. P. 1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502
- 11. *Stull R.B.* An introduction to boundary layer meteorology. Springer Science & Business Media. V. 13. 1988.
- Arnfield A.J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International J. Climatology. 2003. V. 23. № 1. P. 1–26. https://doi.org/10.1002/joc.859
- Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // Remote sensing of environment. 2003. V. 86. № 3. P. 370–384. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8
- Schwarz N., Schlink U., Franck U., Großmann K. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators— An application for the city of Leipzig (Germany). Ecological indicators. 2012. V. 18. P. 693–704. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.001

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 4 2022

15. Derdouri A., Wang R., Murayama Y., Osaragi T. (2021). Understanding the Links between LULC Changes and SUHI in Cities: Insights from Two-Decadal Studies (2001–2020). Remote Sensing. 2021. V. 13. № 18. P. 3654.

https://doi.org/10.3390/rs13183654

- 16. *Rasul A. et al.* A review on remote sensing of urban heat and cool islands // Land. 2017. V. 6. № 2. P. 38. https://doi.org/10.3390/land6020038
- 17. Schonwald B.- Determination of vertical temperature profiles for the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry. Boundary-Layer Meteorology. 1978. V. 15. № 4. P. 453–464. https://doi.org/10.1007/BF00120607
- Гайкович К.П., Кадыгров Е.Н., Косов А.С., Троицкий А.В. Термическое зондирование пограничного слоя атмосферы в центре линий поглощения кислорода. Изв. Вузов, Радиофизика. 1992. Т. 35. № 2. С. 130–136.
- 19. *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. Академии наук. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.
- 20. Lohnert U. et al. Advances in continuously profiling the thermodynamic state of the boundary layer: Integration of measurements and methods // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2008. V. 25. № 8. P. 1251–1266. https://doi.org/10.1175/2007JTECHA961.1
- Юшков В.П. Что может измерять температурный профилемер // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 76-88. https://doi.org/10.3103/S1068373914120097
- 22. Смирнова М. М., Рубинштейн К. Г., Юшков В. П. Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 2011. № 12. С. 5–16. https://doi.org/10.3103/S1068373911120016
- 23. Michalakes J. et al. The weather research and forecast model: software architecture and performance // Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. – World Scientific: Singapore, 2005. P. 156–168. https://doi.org/10.1142/9789812701831 0012
- Skamarock W.C. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. // NCAR Technical Note, 2008. 520 p.

https://doi.org/10.5065/D68S4MVH

- 25. https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs/documentation.php
- 26. Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. Mon. Wea. Rev. 2004. V. 132. P. 519–542. https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0519: EFOWPU>2.0.CO;2
- 27. *Iacono M.J. et al.* Radiative forcing by long–lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative

transfer models. JGR, 2008. V. 113. D13103. https://doi.org/10.1029/2008JD009944

- Ek M.B. et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model // JGR: Atmospheres. 2003. V. 108. D22. https://doi.org/10.1029/2002JD003296
- Grell G.A, Devenyi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques // Geophys. Res. Lett., 2002. V. 29. P. 1693. https://doi.org/10.1029/2002GL015311
- 30. Bougeault P., Lacarrere P. Parameterization of Orography–Induced Turbulence in a Mesobeta––Scale Model // Mon. Wea. Rev. 1989. V. 117. P. 1872–1890. https://doi.org/10.1175/15200493(1989)117<1872:POOI-TI> 2.0.CO;2
- Deardorff J.W. Theoretical expression for the countergradient vertical heat flux // JGR, 1972. V. 77. № 30. P. 5900–5904. https://doi.org/10.1029/JC077i030p05900
- 32. *Chen F. et al.* The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems // International J. Climatology. 2011. V. 31. № 2. P. 273–288. https://doi.org/10.1002/joc.2158
- 33. *Юшков В.П. и др.*. Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 13–31. https://doi.org/10.31857/S0002-351555513-31
- 34. 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. № 1. P. 116–120. https://doi.org/10.1109/36.210451
- Landsberg H.E. Meteorological observations in urban areas // In Meteorological Observations and Instrumentation. American Meteorological Society, Boston, MA, 1970. P. 91–99. https://doi.org/10.1007/978-1935704-35-5_14
- 36. *Oke T.R.* Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites // In Air pollution modeling and its application. XVII. Springer, Boston, MA, 2007. P. 615–631.
 - https://doi.org/10.1007/978-0-387-68854-1_66
- Lokoshchenko M.A. Urban 'heat island'in Moscow // Urban climate. 2014. V. 10. P. 550–562. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.008
- Ponomarev N., Yushkov V., Elansky N. Air Pollution in Moscow Megacity: Data Fusion of the Chemical Transport Model and Observational Network // Atmosphere. 2021. V. 12. № 3. P. 374. https://doi.org/10.3390/atmos12030374

Thermal Stratification of the Boundary Layer over Megacities: Comparison of Model and Observational Data

V. P. Yushkov*

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia *e-mail: yushkov@phys.msu.ru

Comparison of long-term systematic measurements of thermal stratification in the boundary layer over Moscow megacity with high resolution model simulations was carried out. Model's results demonstrate more stable stratification at night and in winter. Under unstable conditions even in winter models dampen arising instabilities too much, which leads to an underestimation of the spectrum of mesoscale fluctuations, average gradients, and their dynamics in the lower part of the ABL in the models. A simple algorithm for errors estimation in numerical forecasts is proposed and it is shown that errors of the near-surface temperature forecast are mainly related to the boundary layer simulation. It is shown that microwave radiometers operating at about 60 GHz can become a simple and reliable tool for estimating the accuracy of boundary layer parameterizations in the weather forecast models.

Keywords: boundary layer, thermal stratification, temperature profiler, mesoscale model, Moscow megacity, systematic errors