

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ КРУПНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ г. ЧЕЛЯБИНСКА)

О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев, А.И. Приказчиков, Д.Н. Соболев

В статье исследована возможность применения модели WRF (Weather Research and Forecasting) для исследования характеристик пограничного слоя атмосферы и его эволюции над крупным промышленным городом в условиях зимнего антициклона. Обсуждается влияние процессов, связанных с антропогенной деятельностью, неоднородностью городского ландшафта на развитие городского острова тепла. Получено, что WRF относительно хорошо описывает наблюдаемую структуру пограничного слоя с его температурной инверсией в нижнем 150-метровом слое и почти изотермическую стратификацию в однородном слое выше 300 м. Однако интенсивность инверсии оказывается значительно заниженной (примерно на 4 °С). Вычислительные эксперименты показывают, что абсолютная разность между наблюдаемой и рассчитанной температурой монотонно убывает во времени и после 18 часов от начала расчета сохраняется в пределах ± 1 °С на всех расчетных уровнях в пограничном слое. Обнаруживается некоторая инерция в эволюции смоделированных характеристик пограничного слоя в период восхода – захода солнца, когда происходит быстрое изменение температуры воздуха в нижнем слое (менее 150 м).

При низких температурах (ниже –10 °С) и слабых ветрах поля метеохарактеристик изменяются под воздействием городского острова тепла, представляя собой две температурные аномалии до $+2 \div +4$ °С, разделенные более холодной областью долины реки. Смоделированное поле ветра на разных уровнях в пограничном слое согласуется с температурным максимумом над обширной промышленной территорией в том, что в приземном слое здесь формируется зона дивергенции ветра, которая связана с нисходящими движениями воздуха, тогда как зона конвергенции вдоль долины реки связана с горизонтальными движениями «туннельного эффекта». Обнаружено, что при взаимодействии городского острова тепла с особенностями орографии города формируется необычно сильная струя на нижних уровнях над возвышенной частью города, занятой металлургическими предприятиями, которая, возможно, ответственна за сдвиги ветра над этой территорией. В целом структура циркуляций городского острова тепла может рассматриваться как стационарный фронт – один из новых объектов будущих мезомасштабных исследований.

Ключевые слова: мезомасштабное моделирование с WRF, пограничный слой атмосферы, обоснование схем параметризации, двухкупольный городской остров тепла, природно-антропогенные ландшафты, нижнеуровневая струя.

Введение

Численный прогноз погоды для урбанизированных территорий является одним из главных направлений современной метеорологии. Среди прочих задач направления, представляемая работа касается двух взаимосвязанных вопросов влияния города на эволюцию метеорологических систем. Первый вопрос возникает из необходимости сочетания высокого пространственно-временного разрешения моделируемых полей с учетом того, что урбанизация территорий настолько изменяет термодинамические характеристики подстилающей поверх-

ности, что это отражается на температурном, влажностном и ветровом режиме пограничного слоя атмосферы в локальном и региональном масштабе. Это, очевидно, требует не только детальной постановки начальных и граничных условий для мезомасштабных моделей, но и разработки более совершенных моделей пограничного и приземного слоев, схем параметризации турбулентного обмена, процессов излучения и других физических процессов, происходящих в антропогенных ландшафтах. Вторым вопросом возникает в связи с уникальным результатом взаимодействия города и окружающей среды – появлению «городского острова тепла», обозначенного не только температурным контрастом между крупным городом и пригородными территориями, но и особой системой циркуляций городского атмосферного пограничного слоя, в том числе определяющей перенос и рассеяние загрязняющих веществ.

Для изучения и прогноза атмосферных процессов, протекающих над ограниченной территорией, используются мезомасштабные метеорологические модели, которые базируются на трехмерных нестационарных уравнениях гидротермодинамики атмосферы и на параметризации процессов тепло- и влагообмена между деятельным слоем земной поверхности и атмосферой. Несмотря на то, что компьютерная реализация таких моделей требует применения высокопроизводительных вычислительных ресурсов, исследования метеоусловий, складывающихся под влиянием урбанизации, ведутся во многих крупных городах мира. Дело в том, что наряду с общими закономерностями инфраструктуры мегаполисов, каждый город имеет свое неповторимое сочетание природных и техногенных условий, позволяющих ожидать и индивидуальных проявлений «острова тепла» в каждом конкретном городе.

Очевидно, что исследования локальных циркуляций будут актуальны для большинства крупных городов России с неблагоприятным по качеству атмосферным воздухом и, в частности, для Челябинска, сочетающего исторически функцию регионального мегаполиса и крупнейшего промышленного центра. В настоящей работе оценены возможности использования мезомасштабной численной модели WRF (Weather Research and Forecasting) для описания общих характеристик городского «острова тепла» и строения пограничного слоя атмосферы над территорией г. Челябинска.

1. Краткое описание модели прогностической модели Weather Research and Forecasting

Модель WRF – это мезомасштабная прогностическая модель и система ассимиляции данных нового поколения. Создание WRF является результатом совместной работы многих научных организаций, руководимых Национальным центром атмосферных исследований (NCAR) США. Модель разработана для исследования атмосферных процессов и явлений среднего пространственного масштаба, в частности мезомасштабных систем осадков. Она включает в себя передовые

технологии численного моделирования и ассимиляции данных, возможности расчета на вложенных сетках и усовершенствованные методы параметризации физических процессов.

WRF может быть использована для выполнения широкого круга задач: от изучения идеализированных циркуляционных систем (например, LES, конвекция, бароклинные волны) до прогнозирования погоды в оперативном режиме, с преимущественным применением на пространственных сетках с шагом 1–10 км. Инфраструктура программного обеспечения WRF Software Framework включает в себя динамические ядра (dynamic solvers), связанные с ними пакеты физических параметризаций и программы для их запуска. В модели WRF представлены два динамических ядра. Первое, Advanced Research WRF (ARW) решает задачи для ограниченной территории в декартовой системе координат, и является разработкой Национального центра атмосферных исследований (NCAR) [1]. Второе, Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM), произведено в Национальном центре прогнозов окружающей среды (NCEP) США, и имеет существенное отличие от ARW, хотя многие параметризации физических процессов могут использоваться для решения на обоих ядрах [2].

В данной работе была использована модель WRF с динамическим ядром ARW. WRF-ARW является численной негидростатической моделью атмосферы (с возможностью гидростатического режима) в предположении полностью сжимаемой среды. В модели используется C-сетка Аракавы и схемы интегрирования Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядка по времени, а также схемы 2-6 порядка для переноса в горизонтальном и вертикальном направлениях. Код модели WRF-ARW содержит несколько программ инициализации (ideal.exe и real.exe), программу численного интегрирования (wrf.exe) и ряд других. Модель WRF-ARW поддерживает множество возможностей: моделирование реальных и идеализированных данных, выбор для них различных граничных условий, обширный набор параметризаций физических процессов, негидростатическое и гидростатическое приближение (на выбор), проведение расчетов во вложенных областях с односторонним и двусторонним влиянием; использование в приложениях с масштабами, меняющимися от метров до тысяч километров. Модель WRF установлена в суперкомпьютерном центре Южно-Уральского государственного университета на суперкомпьютерах «СКИФ-Аврора» и «Торнадо». Производительность суперкомпьютеров семейства «СКИФ-Аврора» исследовалась в [3] для решения индустриальных задач. Данная работа представляет собой опыт решения задач суперкомпьютерного моделирования природной среды, в частности атмосферного пограничного слоя.

Системными требованиями, необходимыми для установки и работы модели являются компилятор ФОРТРАН 90 или 95, PERL 5.04 или выше, библиотеки MPI и OpenMP. Программный интерфейс API ввода/вывода модели WRF поддерживает форматы: netCDF, pnetCDF, PHD5, GriB 1 и GriB 2, для которых должны быть установлены соответствующие библиотеки.

Для выражения процессов обмена между атмосферой и земной поверхностью используется модель подстилающей поверхности Noah LSM. Ее использование обусловлено необходимостью учета потоков тепла, момента импульса и влаги подсеточного масштаба. Нижняя граница в атмосферных моделях является единственной, где требуется явное физическое представление этих потоков. Численная модель земной поверхности играет особо важную роль в случае использования более сложных схем параметризации пограничного слоя атмосферы, которые очень чувствительны к потокам массы и энергии. Помимо этого качество модели поверхности играет большую роль в выборе схем параметризации облачности, которые чувствительны к структуре пограничного слоя. Прогностическим численным моделям требуется учитывать мезомасштабные циркуляции, которые вызваны неоднородностями альбедо поверхности, температуры и влажности почвы, типом землепользования и снеговым покровом. Модель Noah LSM обеспечивает для атмосферной модели по крайней мере четыре важных параметра: 1) поток явного тепла; 2) поток скрытого тепла; 3) поток длинноволновой радиации от земной поверхности; 4) количество отраженной коротковолновой радиации, что означает знание альбедо поверхности, включая эффект отражения от снегового покрова. Noah LSM в составе WRF учитывает физические процессы, протекающие в замерзших грунтах, временную изменчивость плотности снега, пространственно неоднородный снеговой покров и шероховатость его поверхности. Также модель содержит описание процессов передачи тепла под снеговым покровом, переменную теплопроводность почвы, сезонную изменчивость излучения земной поверхности. Помимо этого в модель Noah введены дополнительные схемы для урбанизированных участков земной поверхности: UCM и BEP – однослойная и многослойная модели приземного слоя.

Для географической привязки модели: указание региона, для которого производится прогноз, характер рельефа и распределение типов землепользования земной поверхности – используются глобальные топографические данные различного разрешения – от 10 угловых минут до 30 секунд. Входные данные метеорологических полей представляют собой архивы данных реанализа глобальной модели GFS (Global Forecasting System) NCEP, либо Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) и других центров, либо данные предшествующего прогноза самой модели WRF. Начальные и граничные условия для локальных метеорологических моделей формируются с использованием данных объективного анализа.

2. Характеристика региона, исходных данных и конфигурации модели

Челябинск расположен в зоне умеренно континентального климата с типичными для лесостепной зоны среднегодовыми значениями температур $+2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и количеством осадков 550 мм (1961–1990 гг.). В пределах городской черты пере-

пады высот составляют 210–240 метров над ур.м., с постепенным понижением с запада на востоку. Слабохолмистый рельеф разрезается долиной р. Миасс и ложбинами крупных водоемов: на северо-востоке — это оз. Первое, на юге — оз. Смолино и Синеглазово, на юго-западе — Шершневское водохранилище. В последние десятилетия в Челябинске и на территории Южного Урала в целом отмечается снижение суровости зим по причине повышения средних зимних температур [4]. Расчет интенсивности острова тепла Челябинска проведенный по данным, пригородных метеостанций Шершни и Баландино и восьми стационарных постов, расположенных в черте города, показал, что с 1987 по 2004 г. среднегородские температуры в зимние месяцы были выше пригородных на $1,4 \div 4,8$ °С. В теплый сезон контрасты значительно слабее: от 0,8 до 1,4 °С.

Поскольку в [4] было установлено, что остров тепла в приземном слое имеет двухкупольную форму, обусловленную особенностями орографии Челябинска, то первой задачей, решаемой с помощью численного моделирования, было уточнение пространственной формы и описание эволюции «острова» во времени. В качестве периода для интенсивного исследования выбран интервал с 8 по 12 декабря 2011 года, когда над Южным Уралом установилась типичная для этого времени года зимняя антициклональная погода, характеризующаяся умеренно низкими приземными температурами (ниже -10 °С) и слабым ветром до 1–2 м/с. Такие метеорологические условия в сочетании с увеличением выбросов тепла и влаги промышленностью, энергетикой и автотранспортом, способствуют формированию «острова тепла» над городом, при этом температура воздуха внутри городской черты Челябинска может превышать пригородную на 2 °С и более [4]. Кроме того, интерес к исследованию эволюции острова в такой ситуации объясняется тем, что в условиях штиля и температурной инверсии оседания рассеяние примесей в атмосфере затруднено, и в городе формируется повышенный уровень загрязнения воздуха.

Область моделирования ограничена по широте $54,8 \div 55,5$ с.ш. и по долготе $60,7 \div 62,1$ в.д., фрагмент ее, включающий г. Челябинск и окружающие его территории, представлен на рис. 1. Разрешение модели по горизонтали составляет 2 км, горизонтальная сетка включает 45×40 точек. По вертикали было задано 34 σ -уровня, 7 из которых находятся в нижнем слое 1 км. Расчеты производились для периода с 00:00 ВСУ 08.12.2011 по 00:00 ВСУ 10.12.2011, граничные условия менялись каждые 6 ч. В качестве начальных и граничных данных использовались метеоданные анализа NCEP с пространственным разрешением 0,5 град по широте и долготе. После ряда тестов с одними и теми же начальными и граничными условиями и с учетом работ других авторов по моделированию процессов в холодный период года были выбраны следующие схемы параметризации, описанные в [5]: для микрофизических процессов – WRF single-moment 3-class scheme [6]; для потоков длинноволновой радиации – RRTM [7]; для потоков коротковолновой радиации – схема Дудья [8]; параметризация пограничного слоя – схема университета Yonsei [9]; для параметризации процессов в почве и на по-

верхности – схема Noah [10]. Для задания параметров подстилающей поверхности в городской застройке использована однослойная модель городского приземного подслоя UCM (Urban Canopy Model)

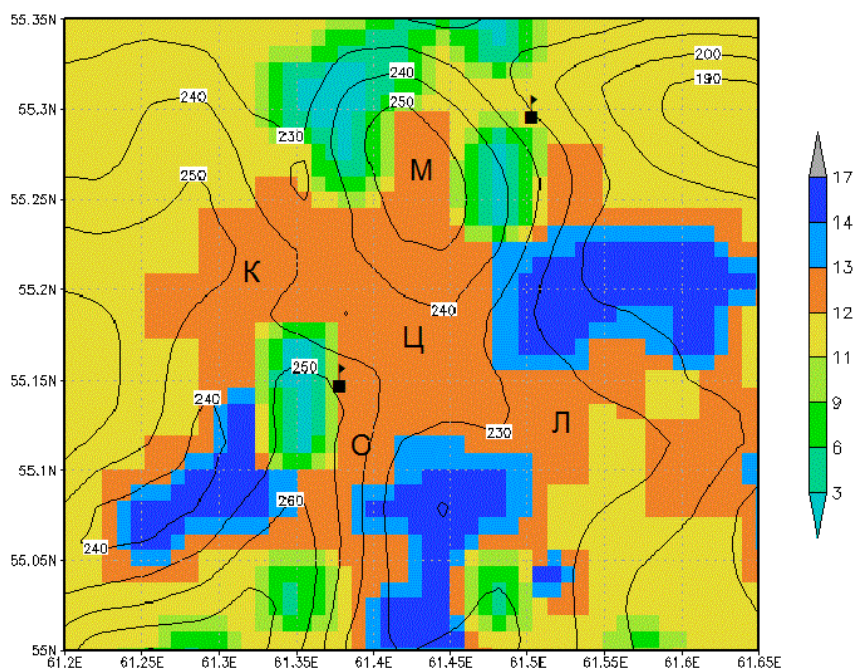


Рис. 1. Фрагмент области моделирования, содержащий территорию города, с указанием типов землепользования. Обозначения соответствуют принятым в модели WRF категориям: 13 – городская застройка; 12 – пашня, 6 – 7 – залежи, покрытые кустарником и др., 10 – 11 местности, занятые луговой растительностью, заболоченные земли; 1–2, 3–4, 5 – хвойный, лиственный и смешанный лес, 17 – водные объекты. Символами указано положение АМСГ Баландино и ЧЦГМС МТП-5 (см. в тексте). Расположение основных районов города: М – Metallургический, К – Калининский, Ц – Центральный, С – Советский, Л – Ленинский

Поскольку в основные задачи работы входило тестирование качества моделирования городского пограничного слоя (ПСА) в конкретных условиях устойчивой погоды, заснеженного окружения и водоемов, покрытых льдом, то главным образом необходимо было убедиться, что выбранная конфигурация модели удовлетворительно описывает внутрисуточные изменения в ПСА. Для этого ежечасные выходные продукты модели были сопоставлены со сглаженными во времени данными измерений температуры, ветра и других метеовеличин на уровне 2 м АМСГ Баландино и данными микроволнового температурного профилемера МТП-5, установленного на крыше Челябинского гидрометцентра (ЧЦГМС). Поскольку МТП-5 измеряет температуру воздуха в слое от 0 до 1000 м над поверхностью земли с шагом 50 м, то эти данные были линейно интерполированы к высоте близлежащих σ -уровней модели (всего 8 уровней).

Географические точки расположения профилемера ($55,15^\circ$ с.ш., $61,37^\circ$ в.д.) и метеостанции ($55,3^\circ$ с.ш. $61,5^\circ$ в.д.) достаточно репрезентативны для оценки вер-

тикального развития острова тепла и его периферийного взаимодействия с окружающей воздушной массой. Профилемер (см. рис. 1) находится в пределах жилой застройки Центрального района города, недалеко от плотины Шершневого водохранилища. Метеостанция областного аэропорта АМСГ Баландино расположена к северу от озера Первое, непосредственно у северо-восточной границы города, к востоку от Челябинского металлургического комбината.

3. Результаты моделирования и их анализ

По способам сопоставления моделируемых и наблюдаемых полей метеовеличин, результаты работы объединены в три раздела, где обсуждается эволюция параметров приземного слоя и термическая структура погранслоя (3.1), пространственно-временные особенности (3.2) и циркуляционная система острова тепла (3.3).

3.1. Эволюция параметров пограничного слоя

Сравнение суточного хода модельной t_m и измеренной t_o температуры воздуха показало, что модель существенно сглаживает суточную амплитуду наблюдаемых в реальности колебаний температуры (рис. 2а). При этом средние за период наблюдений значения модельной температуры воздуха t_m и наблюдавшейся t_o

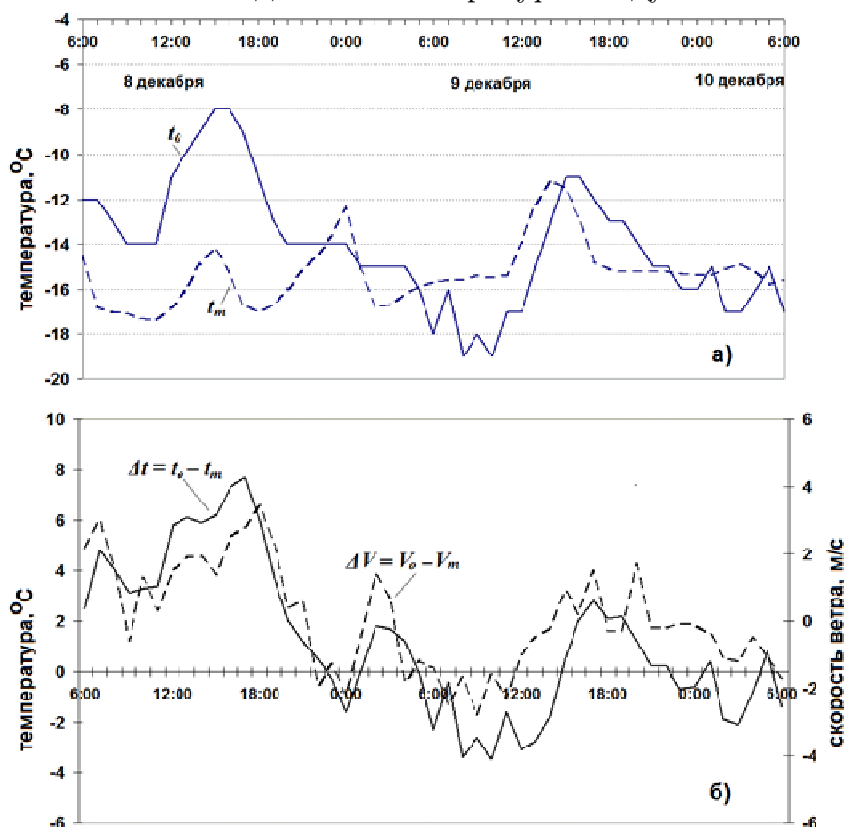


Рис. 2. а) Суточный ход температуры на уровне 2 м по данным измерений t_o и смоделированной t_m в точке расположения АМСГ Баландино;
б) суточный ход разности температуры $\Delta t = t_o - t_m$ и скорости ветра $\Delta V = V_o - V_m$ в той же точке

на метеостанции Баландино достаточно близки, а соответствующие стандартные отклонения сильно различаются: $t_m = -15.3 \pm 1.4$ °C и $t_o = -14.1 \pm 2.7$ °C. Неизвестно, может ли это означать, что при осреднении за длительный период модель так же произведет почти несмещенную оценку среднего от наблюдений, но в более узком интервале отклонений, т.е. подавляет ли модель развитие турбулентности. Другим требующим интерпретации фактом является уменьшение абсолютной разности $\Delta t = t_o - t_m$ с 4 °C в начале расчетов до -0.3 °C в конце (см. рис. 2б).

Ниже будет показано, что аналогичное явление уменьшения ошибок модели во времени свойственно всему нижнему слою атмосферы. Например, средняя скорость ветра на станции, $V_o = 2,0 \pm 1,6$ м/с и была слегка больше моделируемой, $V_m = 1,7 \pm 1$ м/с, но и в этом случае разница в скорости ветра $\Delta V = V_o - V_m$ уменьшалась от начала к концу периода наблюдений в явном согласии с ходом разности температур Δt (рис. 2 б). Наиболее существенное отличие ΔV обнаружено 8 декабря с 6:00 до 20:00 местного времени, когда на станции дул юго-восточный ветер ≈ 4 м/с, а модельный ветер V_m был ≈ 2 м/с, достигнув сопоставимого значения 4,2 м/с лишь к началу следующих суток. В дальнейшем ветер на станции стих и знак ΔV в целом определялся значением скорости модельного ветра V_m .

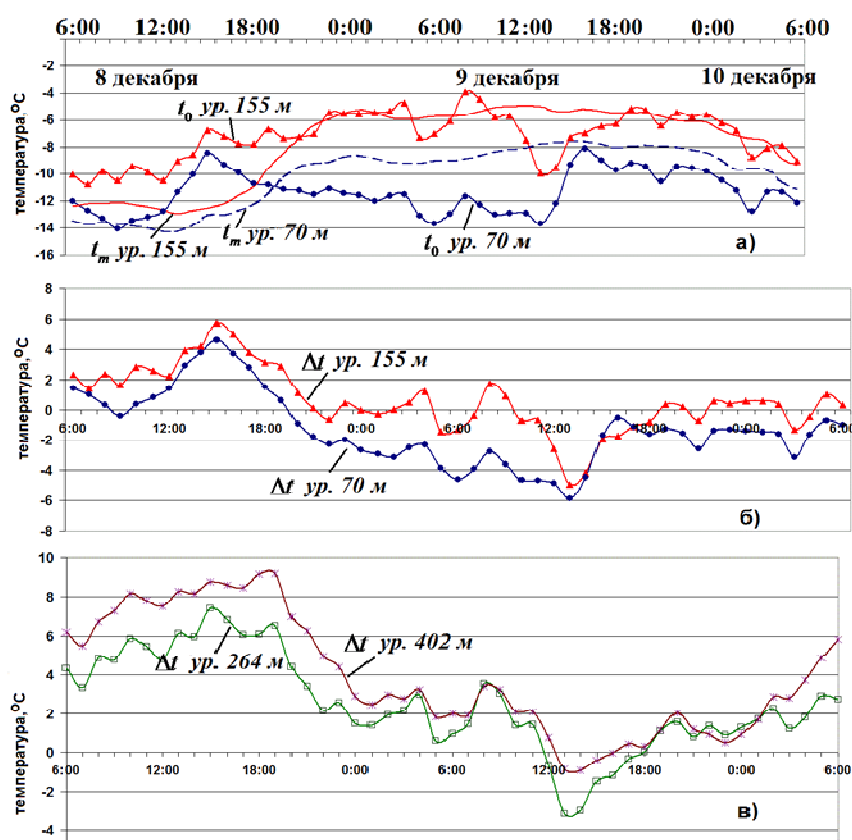


Рис. 3. Временной ход а) наблюдаемой t_o и моделируемой t_m температуры воздуха на высотах 70 и 155 м, а также б) их абсолютной разности $\Delta t = t_o - t_m$ на высотах 70 и 155 м; и в) на высотах 264 и 402 м

Сравнение наблюдаемого давления и давления, моделируемого WRF, показывает, что в течение первых 18 часов расчетов шло очевидное «приспособление» модели к начальным и граничным условиям. Так, если первые 18 часов на станции шел рост давления с 1004 до 1006 гПа, то модельное приземное давление адаптировалось в течение первых 18 часов с 998 гПа до 1007 гПа. Очевидное замедление согласования полей давления видимо повлияло и на ошибки других приземных величин. В связи с этим в остальной части работы мы акцентируем внимание на интервале времени после 00:00 09 декабря, когда результаты моделирования можно было считать «установившимися».

Эволюция наблюдаемой и моделируемой термической структуры погранслоя на высотах, характеризуется графиками на рис. 3 и 4. Рис. 3 демонстрирует временной ход наблюдаемой t_o и моделируемой t_m температуры воздуха на высотах 70 м и 155 м (см. рис. 3а), а также их абсолютной разности Δt (см. рис. 3б). Как и следовало ожидать, на ближайшем к земной поверхности уровне 70 м суточная амплитуда как t_o , так и t_m выше. Этому же уровню по высоте соответствует и наибольшая средняя разность Δt между моделью и наблюдениями. Как и в случае приземных температур средние значения t_o и t_m на этой высоте относительно мало отличаются: $-11,4\text{ }^\circ\text{C}$ и $-10,1\text{ }^\circ\text{C}$, соответственно, причем абсолютная разность температур максимальна $4,6\text{ }^\circ\text{C}$ в начале расчетов и, испытывая колебания, спустя 12 часов уменьшается до $0,5\text{ }^\circ\text{C}$. Выше, на уровнях 264 м и 402 м (см. рис. 3в) размах отклонений Δt на $2\text{--}3\text{ }^\circ\text{C}$ больше, чем в нижнем слое, причем наименьшие модули Δt наблюдаются на 155 м.

Необходимо заметить, что темп уменьшения ошибки на разных высотах различен, поэтому воспроизводимая моделью температурная стратификация $t_m(z)$ существенно отличается от наблюдаемой $t_o(z)$ (см. рис. 4). Так, даже когда средние Δt минимальны, сравнивая утреннюю (07:00) и дневную (14:00) 09.12.2011 стратификации, можно заметить, что модель существенно сглаживает температурный контраст между нижним и верхним уровнем пограничного слоя, т.е. фактически недооценивает интенсивность инверсии. При этом можно заметить, что различия $t_m(z)$ и $t_o(z)$ утром и днем более существенны, чем в вечерний период (19:00, 23:00). Возвращаясь к суточному ходу рис. 2а и рис. 3б, можно заметить, что именно в период роста температур наблюдаются максимальные отклонения Δt .

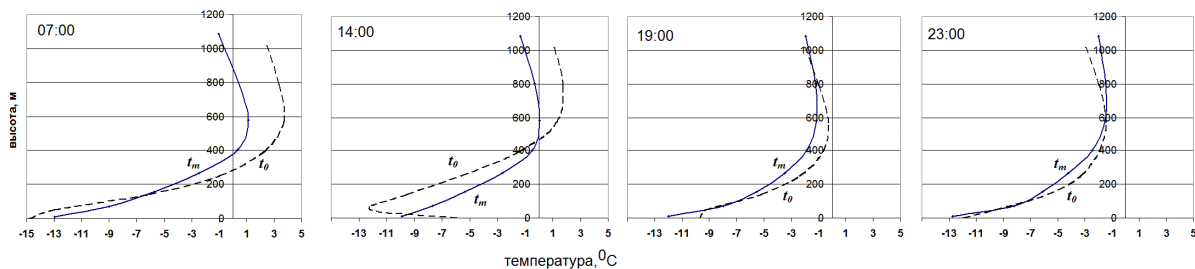


Рис. 4. Температурная стратификация по данным МТП-5 t_o и расчетам WRF t_m в 07, 14, 19 и 23 ч местного времени (BCB+6 ч) 09.12.2011

В целом можно сделать выводы, что при данном пространственном разрешении и выбранных схемах параметризации модель по отношению к наблюдаемым данным занижала значения температуры воздуха на высотах от 150 м до 600 м. И наоборот, на ближайших к поверхности уровнях, расчетные значения слегка превышают измеренные. Рассчитанная по модели температурная стратификация имеет более сглаженный вид. Вместе с тем модель так же регистрирует инверсионную стратификацию в пограничном слое, связанную с оседанием и адиабатическим нагревом воздуха в антициклоне. Однако интенсивность инверсии оказывается заниженной: разница между показаниями МТП-5 и моделью в слое от земной поверхности до высоты 800 м составляет $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ за период расчета.

3.2. Пространственно-временные особенности острова тепла

В работах [4, 11], основываясь на данных измерений температуры воздуха и скорости ветра на постах экологического мониторинга в черте города и двух пригородных метеостанций, было установлено, что в холодный период года остров тепла интенсифицируется. При этом изоплета $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в пределах городской черты повторяет очертания долины реки Миасс, разделяющей остров тепла на западную и восточные части. Тем самым моделируемый остров тепла Челябинска должен иметь черты, характеризующиеся двухкупольной формой. На рис. 5 представлено полученное по результатам моделирования распределение аномалии температуры воздуха на уровне 2 м над землей: разности между значением температуры в каждой точке сетки и средней температуры по области $55,00^{\circ} \div 55,35^{\circ}$ с.ш. и $61,20^{\circ} \div 61,65^{\circ}$ в.д. Как и ожидалось, в ночные и предутренние часы (рис. 5а), когда температуры минимальны, интенсивность острова тепла максимальна. В нашем случае контраст между температурой в городе и пригородными территориями достигает $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различается по площади города. Наибольшие контрасты соответствуют крупным промышленным и транспортным зонам Metallургического, Советского и Центрального районов. В дневное время (см. рис. 5б), контраст сохраняется, но его интенсивность уменьшается до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в южной части города.

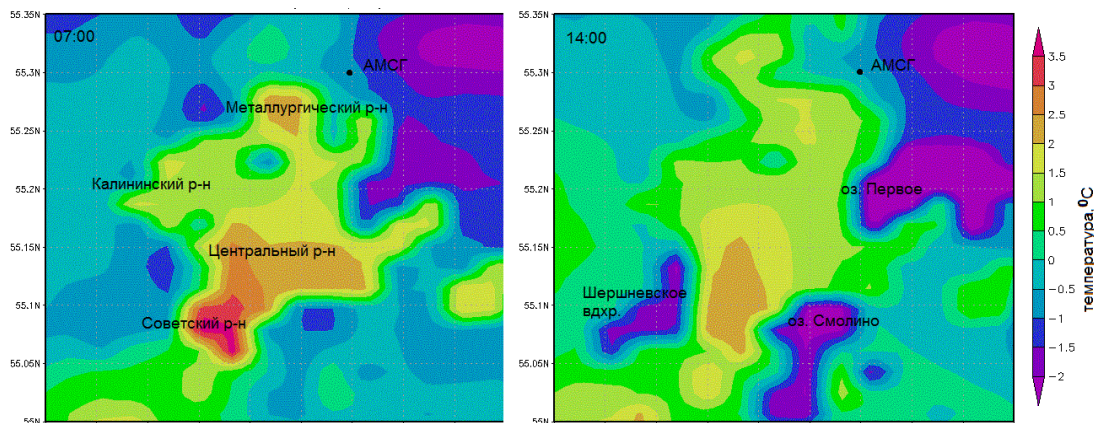


Рис. 5. Распределение аномалии температуры воздуха (см. текст) на уровне 2 м
а) 07:00 и б) 14:00 местного времени 09.12.2011

Результаты моделирования полей температур на σ -уровнях модели, расположенных в пограничном слое над городом показывают, что в течение двух суток 8–10 декабря 2011 г., суточный ход температуры заметно проявляется только до высоты около 100 м над земной поверхностью. Для выяснения формы и горизонтальной протяженности острова тепла ПСА в этом слое были построены изотермы в период наибольшего прогрева и максимальных антропогенных выбросов тепла в 16 ч. местного времени 9 декабря (рис. 6а), а также в ночное время 00 ч. местного времени 10 декабря (рис. 6б). В целом, в слое до 100 м повторяются очертания острова тепла, как и на рис. 5, выделяются наиболее теплые и возвышенные части города, где расположены Металлургический и Советский районы; видно также, что вдоль долины реки Миасс, обозначенной сплошной линией на рис. 6, располагается зона более холодного воздуха. Суточный ход температуры на этом уровне в приземном слое (≈ 70 м над поверхностью земли) в трех точках, где согласно распределению температур располагаются относительно холодные и теплые зоны, приведен на рис. 6в.

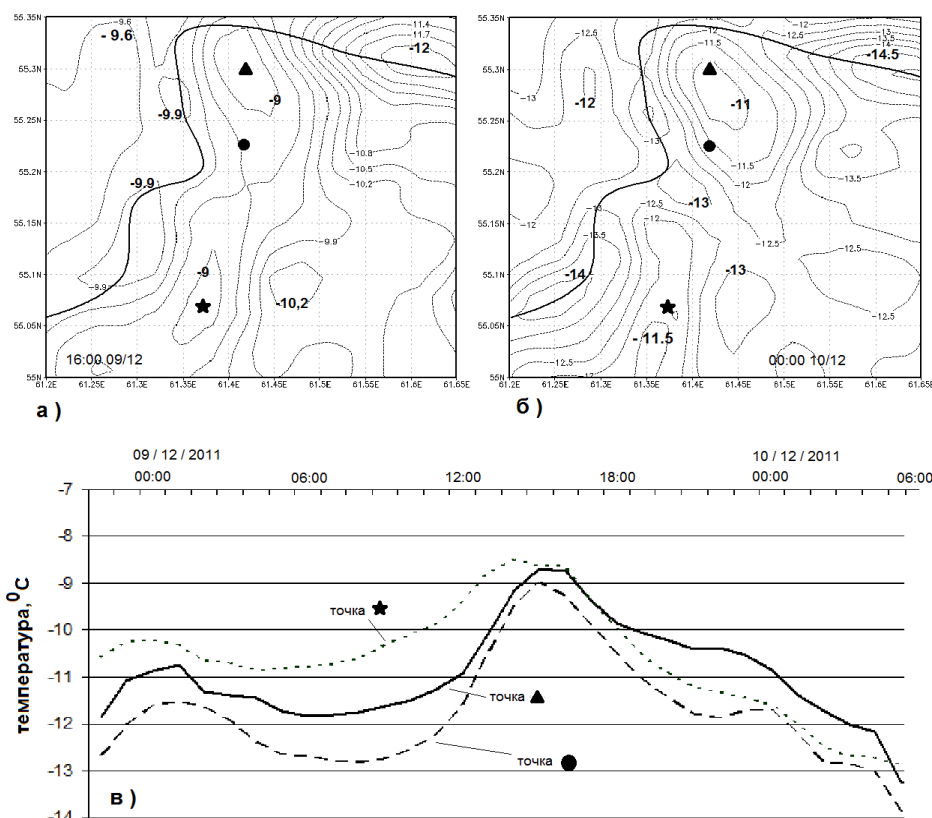


Рис. 6. Поле температуры в приземном слое 70 м над поверхностью земли: а) 09 декабря в 16 ч и б) 10 декабря в 00 ч. местного времени. Сплошная линия указывает положение реки Миасс; в) суточный ход температуры на том же уровне в точках, расположенных в Металлургическом районе (▲), в Советском районе (★) и в долине реки Миасс (●)

Ход температуры показывает, что в течение всего времени моделирования приземный слой долины реки остается на 1–2 °С более холодным. В приповерх-

ностном слое на высоте около 2 м, эта зона также остается более холодной, относительно других территорий г. Челябинска (см. рис. 5а, 5б).

Таким образом, результаты моделирования в целом подтверждают, что остров тепла в центральной части города делится рекой на две крупные подобласти. С другой стороны, оказалось, что остров занимает более значительную территорию, а его пространственная конфигурация более сложная, чем это предполагалось ранее. Остров тепла города Челябинска представляет гребень повышенной температуры, вытянутый с юга, юго-запада на север, северо-восток с понижением в пойме реки Миасс, которая протекает через город и огибает его с севера, а также меньшим повышением температуры над западной территорией города, где в основном располагается жилая застройка.

3.3. Система циркуляций

В работах [4, 11] было показано, что приземный ветер ослабевает от наветренной части города к его центру, где движение воздуха приобретает более ме-

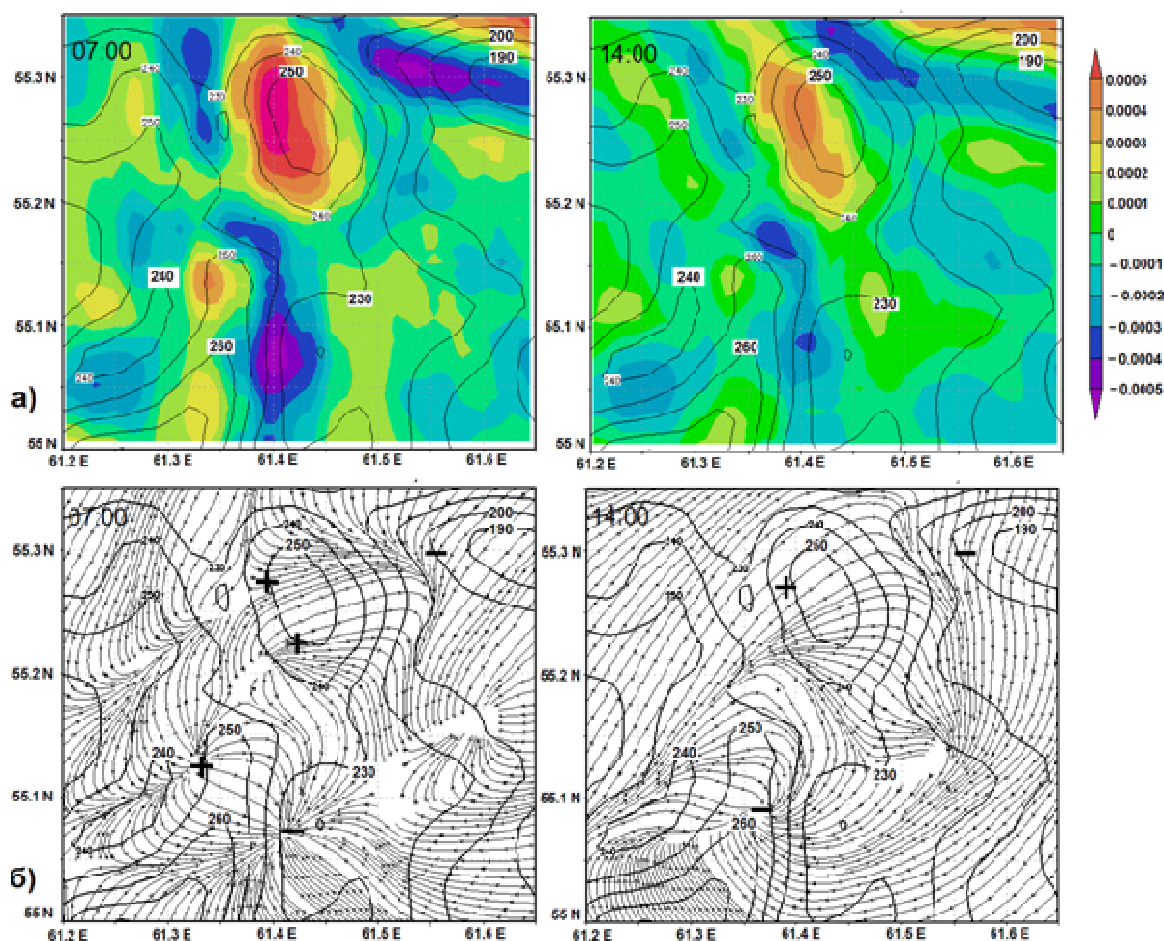


Рис. 7. Поле дивергенции ветра (c^{-1}) 09.12.2011

- а) 07:00 и 14:00 местного времени на уровне ~ 30 м над поверхностью;
 б) линии тока на уровне ~ 90 м над поверхностью. Знаками $+$ и $-$ отмечены зоны дивергенции и конвергенции ветра. Сплошные линии – высоты, м над ур.м.

ридиональное направление. Несмотря на отличия в положении и интенсивности, в центре города возникает зона конвергенции величиной более 10^{-4} с^{-1} , напоминающая по конфигурации изотермы острова тепла.

Моделирование атмосферных циркуляций, демонстрирует, что наиболее отчетливые зоны конвергенции приземного ветра со значениями, достигавшими $6 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, формируются ранним утром примерно в 7 ч. местного времени. Совпадение их с долиной реки Миасс, озером Смолино и другими отрицательными формами рельефа (рис. 7а, слева) можно интерпретировать тем, что в условиях устойчивой антициклональной погоды ночное выхолаживание земной поверхности способствует стоку холодного воздуха с возвышенностей в низины.

В целом, это не противоречит тому, что над центральной частью города и особенно над возвышенной промышленной территорией Metallургического района возникают области дивергенции ветра, превышающие $5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. На высоте 90 м над поверхностью дивергенция уменьшается до $3 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, и ее положение остается там же. На рис. 7б для этого уровня показаны линии тока и положение зон дивергенции и конвергенции. Линии тока построены таким образом, что из значения скорости ветра в каждой точке рассматриваемой области вычитался средний поток на этом уровне. Прием исключения среднего значения адвекции позволяет в полной мере представить картину влияния орографии в жилительной и промышленной зоне на направление и характер циркуляций. Так, потоки обтекают возвышенную северную часть города в восточном, северо-восточном направлении, опускаясь, способствуют возникновению сходимости $4 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ в северо-восточной подветренной пониженной части города. Еще более интенсивная дивергентно-конвергентная пара, которая прослеживается до высот около 100 м, вытягивается вдоль западного, более высокого берега озер Смолино и Синеглазово и пониженной на юге городской территории.

В целом особенности распределения зон конвергенции и дивергенции, характерные для ночных и утренних часов, сохраняются и в дневное время, но их интенсивность заметно убывает (14 ч, на рис. 7а, справа). Область наиболее интенсивной дивергенции до $4 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ продолжает располагаться над территорией Metallургического района. На высотах 90 м по линиям тока, построенным аналогичным образом, хорошо выделяется зона циркуляций над городом, которая как бы «внедрена» в огибающий город с запада и востока атмосферный поток, формирующий мезомасштабный вихрь – своеобразный мезоантициклон.

Таким образом, выделяя атмосферные циркуляции из потока, можно заметить особенности движений воздуха, обусловленные орографией города и распределением его промышленности.

В период, для которого проведено моделирование, над регионом выше приземного слоя наблюдались ветра юго-западного направления. К северо-востоку и востоку от города, в его подветренной части в приземном слое скорости ветра на 1-2 м/с меньше, чем в его наветренной части. Таким образом, в этих условиях городская территорию традиционно можно представить как «мезомасштабную

шероховатость», тормозящую воздушный поток и создающую зону «тени» (рис. 8а). С другой стороны, из анализа градиентов температур, положения зон конвергенции и особенно характера линий тока (см. рис. 5, 6 и 7) в подветренной стороне города возникает некое подобие мезомасштабного стационарного фронта с натеканием теплого воздуха на линзу холодного и значительными приземными градиентами температуры и влажности. Одним из гипотетических элементов циркуляций этого фронта может служить следующее обнаруженное явление. Согласно результатам моделирования (рис. 8б), рано утром скорость в приземном слое в среднем составляла 1 м/с, с ростом до 6–7 м/с на высотах, тогда как над северной возвышенной частью города, где расположена крупная промышленная зона, на высоте около 100 м локализуется воздушная струя со скоростью

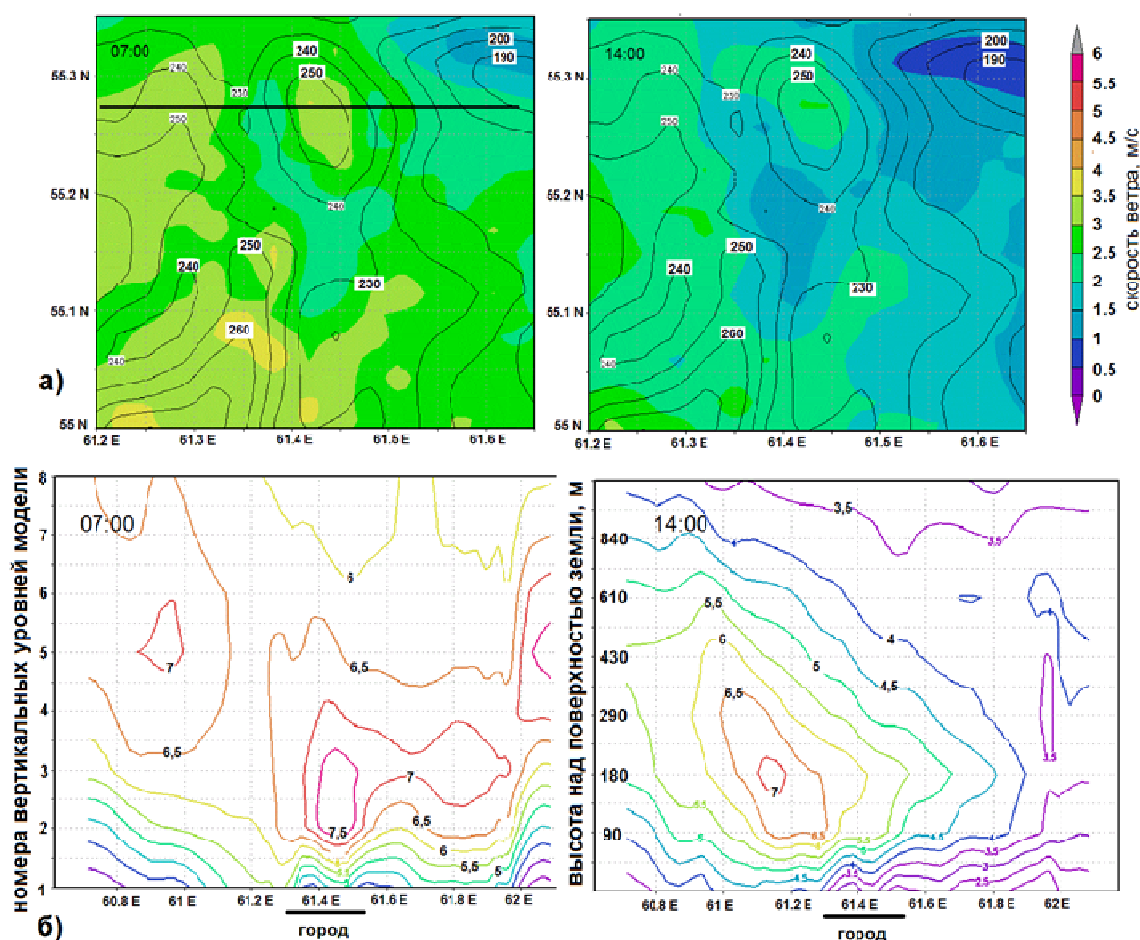


Рис. 8. Распределение скорости ветра в городе и пригородах 09.12.2011 по результатам моделирования. а) Скорость ветра на уровне флюгера в 07:00 и в 14:00 местного времени. На рисунки нанесены линии абсолютных высот, м. б) Вертикальное распределение скорости ветра над городом вдоль 55,27° с.ш. в те же сроки

в ее центре порядка 7,5 м/с.

Днем горизонтальные размеры увеличиваются, и ее интенсивность слабеет. Вертикальная мощность струи составляет около 200 м.

Очевидно, причины появления такой струи могут быть связаны с обтеканием воздушного препятствия и подъемом теплого воздуха создаваемого мощными тепловыми источниками промышленной зоны.

Заключение

По ряду причин численное моделирование эволюции городского пограничного слоя атмосферы в зимний период является одной из важнейших и сложных задач региональной метеорологии. В этом плане приведенный выше опыт по использованию системы моделирования WRF для описания городского острова тепла, может служить позитивным примером экспресс-валидации модели в условиях ограниченной метеоинформации, типичной для крупного российского города. Помимо собственно технологических аспектов реализации модели (разделы 1 и 2), мы старались последовательно сопоставить данные приземных наблюдений *in situ* и моделирования в одной точке, перейдя к интерпретации данных дистанционного зондирования термической структуры погранслоя по вертикали. Очевидно, что по мере увеличения размерности тестируемых пространственно-временных полей с одно-, двумерной задачи (раздел 3.1) к трехмерному представлению острова тепла (раздел 3.2) достоверность количественных оценок уменьшается, а четырехмерный анализ циркуляций (раздел 3.3) вообще является чисто опытным обобщением. Тем не менее, мы считаем, что уже на этом этапе удалось показать следующие уникальные свойства атмосферного пограничного слоя г. Челябинска:

1. Даже при относительно небольших перепадах высот положительные и отрицательные формы рельефа существенно влияют на форму острова тепла.
2. Его интенсивность увеличивается в предутренние часы.
3. Обнаружена дипольная структура полей отрицательной и положительной дивергенции приземного ветра. Очевидно, что для детальной оценки влияния локальных циркуляций на урбанизированную окружающую среду Южного Урала потребуются дальнейшие усилия по развитию систем мониторинга и численного моделирования.

Авторы благодарят магистрантов кафедры вычислительной математики факультета ВМИ ЮУрГУ С.С. Скопина, А.А. Носкова, программистов Суперкомпьютерного центра ЮУрГУ К.В. Бородулина, Ф.М. Мелёхина за техническую помощь в установке и тестировании модели WRF.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (соглашение № 14.В37.21.0613).

Литература

1. Skamarock, W.C. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. – NCAR Tech. Note, June 2008 / W.C. Skamarock. URL: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs> (дата обращения: 11.01.2013).
2. Janjic, Z. Scientific Documentation for the NMM Solver. – NCAR Tech. Note, February 2010 / Z. Janjic, R. Gall, M.E. Pyle. URL: <http://nldr.libar.edu/collections/technotes> (дата обращения: 11.01.2013).
3. Исследование производительности суперкомпьютеров семейства «СКИФ Аврора» на промышленных задачах / А.А. Московский, М.П. Перминов, Л.Б. Соколинский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2010. – № 35(211). – С. 66–78.
4. Оценка жизненного цикла природно-антропогенных систем / С.М. Абдуллаев, Е.Г. Кораблева, Ю.А. Сапельцева и др. // Вестник Челябинского государственного университета. Серия «Экология и природопользование». – 2008. – Вып. 3. – № 17. – С. 34–45.
5. WRF-ARW V3: User's Guide. / W. Wang, C. Beezley, M. Duda, et al. URL: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users> (дата обращения: 11.01.2013).
6. Hong, S.-Y. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation / S.-Y. Hong, J. Dudhia, S.-H. Chen // Monthly Weather Review. – 2004. – Vol. 132 – P. 103–120.
7. Mlawer, E.J. Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmosphere: RRTM, a Validated Correlated-k-model for the Longwave / E.J. Mlawer, S.J. Taubman, P.D. Brown // Journal of Geophysical Research – 1977. – Vol. 102. – No. D14. – P. 16663–16682.
8. Dudhia, J. Numerical Study of Convection Observed During the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-dimensional Model / J. Dudhia // Journal of Atmospheric Science – 1989. – Vol. 6. – P. 3077–3107.
9. Hong, S.-Y. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes / S.-Y. Hong, Y. Noh, J. Dudhia // Monthly Weather Review – 2006. – Vol. 134. – P. 2318–2341.
10. The Community Noah Land-Surface Model (LSM): User's Guide. URL: ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/gcp/ldas/noahls/ver_2.7.1 (дата обращения: 22.02.2013)
11. Кораблёва, Е.Г. Исследования «острова тепла» г. Челябинска в зимний период / Е.Г. Кораблёва, О.Ю. Ленская // Вестник Челябинского государственного университета. Серия «Экология и природопользование». – 2010. – Вып. 4. – № 8. – С. 15–23.

Ленская Ольга Юрьевна, кандидат географических наук, доцент кафедры вычислительной математики, факультет Вычислительной математики и информатики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), lenskaia_olga@mail.ru.

Абдуллаев Санжар Муталович, доктор географических наук, профессор кафедры вычислительной математики, факультет Вычислительной математики и информатики,

Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), sanjar@mail.ru.

Приказчиков Антон Игоревич, магистрант, кафедра системного программирования, факультет Вычислительной математики и информатики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), prikaz08@mail.ru.

Соболев Дмитрий Николаевич, магистрант, кафедра системного программирования, факультет Вычислительной математики и информатики, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), propp.ds@gmail.com.

MODELING STUDY OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER CHARACTERISTICS IN INDUSTRIAL CITY BY THE EXAMPLE OF CHELYABINSK

O.Yu. Lenskaia, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation),

S.M. Abdullaev, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation),

A.I. Prikazchikov, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation),

D.N. Sobolev, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation).

An applicability of Weather Research Forecasting Model (WRF) with single-layer surface parameterization schema to quantifying urban planetary boundary layer (PBL) structure and evolution is evaluated by comparing model-derived results versus conventional thermal profiler, surface and satellite data obtained in Chelyabinsk metropolitan area during typical winter anticyclon. Influence of detailed description of anthropogenic surface processes and landscape inhomogeneities onto urban heat island patterns is discussed also.

WRF relatively well describes the observed vertical PBL structure with temperature inversion in stable surface layer below 150 m, and isothermal well-mixed layer above 300 m, but significantly (more than 4 °C) underestimates subsidence inversion cape intensity. Experiments reveal that an absolute difference between modeling and observed temperatures monotonically decrease with time, and, after 18 hours model runs continuing within ± 1 °C interval at all levels of PBL. Some inertia in evolution of modeled PBL is observed during sunrise/sunset when rapid temperature change at low levels (less than 150 m) occurs.

As was expected for cold weather temperatures below -15 °C and light winds, model fields are perturbed by presence of pronounced urban heat island (UHI) with two surface temperature anomaly up $+2 \div +4$ °C separated by cold river valley. Simulated 3D wind flows suggest that highest temperature maxima in industrial park corresponds to surface divergence region and is produced by descending vertical air motion in contrast to valley convergence induced by horizontal "tunnel effects". The interaction of UHI and complex terrain induced flows resulting unusually strong low level jet. It is assumed that such jet development produces wind shift. Overall circulations structure can be considered in term of UHI stationary frontal boundary – one of new object to future mesoscale studies.

Keywords: WRF mesoscale simulations, planetary boundary layer, validation of parametrization scheme, urban heat island, natural and anthropogenic landscapes, low level jet.

References

1. Skamarock, W.C. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. – NCAR Tech. Note, June 2008. URL: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs> (accessed: 11.01.2013).

2. Janjic Z., Gall R., Pyle M.E. Scientific Documentation for the NMM Solver. – NCAR Tech. Note, February 2010. URL: <http://nldr.libar.edu/collections/technotes> (accessed: 11.01.2013).
3. Moskovskiy A.A., Perminov M.P., Sokolinsky L.B., Cherepennikov V.V., Shamakina A.V. Issledovanie proizvoditelnosti supercomputerov semeistva “SKIF-Aurora” na industrialnyh zadachah [Efficiency Study of “SKIF-Aurora” Supercomputers for Industrial Tasks Solution]. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria Matematicheskoe modelirovanie i programmipovanie [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software] 2010. No. 35 (211). P. 66–78.
4. Abdullaev S.M., Korableva E.G., Sapeltseva Y.A., Egorova A.V., Babintseva V.A., Neverova E.A. Otsenka zhiznennogo tsikla prirodno-antropogennyh sistem [Life Cycle Assessment of Natural – Anthropogenic Systems]. Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekologiya i Prirodopolzovanie [Bulletin of Chelyabinsk State University. Series: Ecology and Nature management]. 2008. Vol. 3, No. 17. P. 34–35.
5. Wang W., Beezley C., Duda M., et al. WRF-ARW V3: User’s Guide. URL: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users> (accessed: 11.01.2013).
6. Hong S.-Y., Dudhia J., Chen S.-H. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation // Monthly Weather Review. 2004. Vol. 132. P. 103–120.
7. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D. Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmosphere: RRTM, a Validated Correlated-k-model for the Longwave // Journal of Geophysical Research. 1977. Vol. 102, No. D14. P. 16663–16682.
8. Dudhia J. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-dimensional Model // Journal of Atmospheric Sciences. 1989. Vol. 6. P. 3077–3107.
9. Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes // Monthly Weather Review. 2006. Vol. 134. P. 2318–2341.
10. The Community Noah Land-Surface Model (LSM): User’s Guide. URL: ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/gcp/ldas/noahlsn/ver_2.7.1 (accessed: 22.02.2013)
11. Korableva E.G., Lenskaia O. Yu. Issledovaniya “ostrova tepla” g. Chelyabinska v zimnii period [Study of Urban Heat Island during Wintertme in Chelyabinsk]. Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekologiya i Prirodopolzovanie [Bulletin of Chelyabinsk State University. Series: Ecology and Nature management]. 2010. Vol. 4, No. 8. P. 15–23.

Поступила в редакцию 25 февраля 2013 г.