

Ю.В. Гаврилова, С.П. Смышляев, А.Г. Махура

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНЫХ ГОРОДОВ НА РЕГИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПОГОДЫ

Y.V. Gavrilova, S.P. Smyshlyayev, A.G. Mahura

A MODEL STUDY OF THE MEGACITIES EFFECTS TO THE REGIONAL ASPECTS OF WEATHER

В настоящем исследовании были произведены оценки пространственного и временного изменения метеорологических величин (температуры воздуха на высоте 2 м и скорости ветра на высоте 10 м.) в результате влияния термических и динамических урбанизационных эффектов на примере крупного промышленного города Санкт-Петербург (Россия). Термические и динамические эффекты урбанизации включали в себя увеличение эффективного параметра шероховатости и добавление антропогенных потоков тепла. Модельные эксперименты проводились с использованием региональной модели численного прогноза погоды Enviro-HIRLAM (Environment – High Resolution Limited Area Model) с горизонтальным разрешением 1.4 км. Анализировалась отдельно взятая синоптическая ситуация (30,31 января 2009 г.) с низкими скоростями ветра и наличием антициклонической циркуляции. Суточный ход метеорологических величин анализировался путем сравнения с результатами наблюдений, как в Санкт-Петербурге, так и в его пригородах.

Ключевые слова: региональная модель численного прогноза погоды, антропогенные потоки тепла, параметр шероховатости, температура воздуха, скорость ветра.

Estimations of spatial and temporal changes of meteorological variables (2m temperature & 10m wind) due to influence of thermal and dynamical factors of highly urbanized megacity Saint-Petersburg (Russia) are done in this investigation. Thermal and dynamic effects of urbanisation included anthropogenic heat fluxes and roughness increasing. Modeling experiments were done using regional NWP model Enviro-HIRLAM (Environment - High Resolution Limited Area Model) with horizontal resolution 1.4 km. Separately taken synoptic situation (on January, 30,31th, 2009) with low speeds of a wind and presence of anticyclonic circulation was analyzed. The simulation results were compared with observations at urban/ sub-urban synoptical stations.

Keywords: regional numerical prediction model, anthropogenic heat fluxes, roughness, temperature, wind velocity.

Города – неотъемлемая часть лика Земли. Они занимают всего лишь 2 % площади суши, но потребляют 3/4 всех мировых ресурсов [Голубчиков, 2001]. В настоящее время наблюдается интенсивный прирост населения планеты, а также усиливается приток людей в крупные города в связи с изменением экономической и социальной ситуации в мире. Урбанизация – результат и фактор развития, поскольку в компактном размещении объектов промышленности и инфраструктуры заложен значительный общественный интерес, дающий населению широкий доступ к образованию, здравоохранению, социальным услугам

и др. Взаимосвязь урбанизации и состояния окружающей природной среды обусловлена рядом факторов в сложной системе социально-экономического развития и взаимодействия общества и природы. Измененный ландшафт, наличие большого количества общественного и частного транспорта, активная деятельность промышленных предприятий приводят к ухудшению качества воздуха в локальном масштабе, но также в региональном и глобальном масштабах.

В России основными центрами с высокой концентрацией населения, являются города, такие как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Новосибирск, Казань, Челябинск. Все эти города-миллионеры являются так же крупнейшими промышленными центрами.

В последние годы интерес к проблеме влияния мегаполисов на погоду, качество воздуха, региональный и глобальный климат существенно возрос. В Европе проводятся многочисленные исследования по этому вопросу. Результаты исследовательских работ по Копенгагену, Мальмо [Mahura et al, 2008], Марселю [Martilli et al, 2002] и др. показали, что урбанизационные эффекты оказывают существенное влияние на метеорологические величины, тем самым возникает необходимость включения таких эффектов не только в исследовательские, но и в оперативные модели численного прогноза погоды, что позволит существенно улучшить качество прогноза. Санкт-Петербург является одним из высокоурбанизированных городов с высокой плотностью населения и хорошо развитой промышленностью. Соответственно урбанизированные эффекты, такие как промышленные и бытовые выбросы газов, аэрозолей, измененный ландшафт, антропогенные потоки тепла оказывают влияние на формирование процессов погоды.

Настоящая исследовательская работа посвящена оценке влияния изменчивости антропогенных потоков тепла и эффективного параметра шероховатости в пределах крупного промышленного города Санкт-Петербурга на метеорологические условия, как первый шаг для учета эффектов урбанизации в интегрированных моделях численного прогноза погоды – изменения качества воздуха.

Методология

Наиболее перспективным методом исследования метеорологических особенностей и загрязнения атмосферы крупных городов является метод физико-математического моделирования, применение которого позволяет давать теоретическое обоснование получаемым закономерностям и прогнозировать метеорологические условия и загрязнения атмосферы города, уточняя прогноз фоновых значений метеоэлементов и концентраций примеси.

В данной работе была использована региональная модель численного прогноза погоды Enviro-HIRLAM (Environmental High Resolution Limited Area Model). Выбранная модель имеет структуру вложенных сеток, что позволяет рассмотреть урбанизированные эффекты более детально. Самая грубая сетка T15 имеет разрешение 15 км. Она охватывает всю Европу, часть Африки и

Северной Америки. Начальные данные модель получает из Европейского центра с интервалом каждые 6 часов. Вложенная в неё сетка уже имеет разрешение 5 км и начальными данными для неё являются выходные данные с модели T15. Для рассмотрения городских эффектов используется сетка более высоким разрешением 1.4 км и начальными для неё условиями являются выходные данные с модели S05[Xiaohua et al, 2005]. Благодаря высокому разрешению модели появляется возможность учета мелкомасштабных процессов, ранее учитываемых как подсеточные, в региональных мезомасштабных моделях. Так же одной из особенностей данной модели является то, что в ней используется вращающаяся сферическая система координат. Все пространственные производные представляются на повернутой сфере. Поворот сферы осуществляется путем смещения южного полюса Земли в точку с координатами $POLON = 10^\circ$ в.д. $POLAT = 40^\circ$ ю.ш. Выбранная область моделирования имеет 144 точки по широте и 170 по долготе.

В оперативной версии модели используется гибридная вертикальная координата, полуневьяный Лагранжев подход к интегрированию уравнений. Физические параметризации модели включают в себя: параметризацию турбулентности CBR на основе решения уравнения баланса энергии турбулентных пульсаций, схемы конденсации, микрофизики облаков и конвекции STRACO, и др. на основе подхода «поток массы», радиационную схему и параметризацию гравитационных волн, схему обмена атмосферы с подстилающей поверхностью ISBA [Xiaohua et al, 2005; Unden et al, 2002].

Для того чтобы рассматривать урбанизационные эффекты, в модель был включен городской модуль (DMI module)[Baklanov et al, 2005]. Основным преимуществом этого модуля это эффективность с точки зрения использования компьютерного времени. Пограничный слой над городскими областями разделен на два/три подслоя. Один подслоя включает в себя так называемый слой шероховатости (включающий логарифмический слой), где может использоваться теория MOST с некоторыми дополнениями для учета именно городской области. Второй подслоя, где условия теории MOST не выполняются, рассматривается новая параметризация для профиля ветра.

Этот модуль включает алгоритмы расчета следующих параметров на каждом шаге, для каждой ячейки сетки имеющей городские особенности [Mahuga et al, 2005; Zilitinkevich, 2005; Grimmond, 1999]:

1. Используя классификацию земель, включает хотя бы один или несколько типов городского класса.
2. Определяет высоту смещения для городского района
3. В зависимости от устойчивости атмосферы производится расчет эффективного параметра шероховатости.
4. Благодаря использованию классификации земель, производит расчет антропогенных потоков тепла.
5. Корректировка значений альбедо для урбанизированных поверхностей.
6. Расчет профилей ветра внутри городского слоя.

Адаптировав модель к выбранному региону (в частности к городу Санкт-Петербург и его окрестностям) были проведены эксперименты, с запуском модели на 48 часов. Эксперименты проводились для зимнего периода года, поскольку порядок значений антропогенных потоков тепла в этот период года в десятки раз выше, чем естественных потоков за счет центрального отопления зданий, для дней с определенной синоптической ситуацией. Отметим, что наиболее яркий эффект влияния антропогенных потоков тепла достигается при антициклонической системе циркуляции с низкими скоростями ветра. Величина включенных в модель антропогенных потоков тепла при расчете менялась от 50 до 200 Вт/м², при этом значения естественных потоков тепла в этот период года составляет порядка 15 Вт/м². Среднее значение эффективного параметра шероховатости для городских районов составляет около 2 м. и более, в зависимости от структуры города, так как Санкт-Петербург является городом с различным характером застройки, среднее значение параметра шероховатости будет равным 2 м., при этом величина данного параметра в естественной среде составляет 0,5 м. для лиственного леса. При выполнении экспериментов, в модель будут включаться рассматриваемые эффекты урбанизации, как по отдельности, так и при различном их комбинировании.

Синоптические условия

Основная роль антропогенных потоков тепла зависит от синоптической ситуации. Наиболее яркий эффект достигается при антициклонической системе с низкой циркуляцией ветра и наличием инверсии. Для выполнения работы были подобраны дни с использованием архивов данных Российского Государственного Гидрометеорологического университета, удовлетворяющие данным условиям.

30 января 2009 г. над выбранной областью исследования наблюдался антициклон, с давлением в центре 1040 Гпа. Санкт-Петербург находился на западной периферии антициклона, он малоподвижен и прибывал в стадии максимального развития. В этот день наблюдалось преимуществен юго-восточное направление ветра со скоростью 1- 3 м/с. В течение дня максимум температуры наблюдался в срок 00:00 часов (по Гринвичу) и равен -2.1 °С, минимум наблюдался в срок 21:00 час (по Гринвичу) и был равен -7.8 °С. В Санкт-Петербурге давление в течение дня увеличивалось от 1022.9 гПа в срок 00:00 часов (по Гринвичу) до 1031.8 гПа в срок 21:00 час (по Гринвичу). По результатам анализа температурного профиля можно сделать вывод, что в ночные часы, а именно в срок 00 часов, наблюдалась изотермия от поверхности земли до уровня 600 м. 31 января 2009 г. средняя скорость ветра составила 1-2 м/с. Максимальная температура воздуха -12.9 °С в срок 00 часов (по Гринвичу), минимум -14.3 °С. В срок 12 часов наблюдалась приземная инверсия до уровня 950 гПа, от этого уровня и до 770 гПа была изотермия. Представленные синоптические ситуации способствуют образованию задерживающих слоев, препятствующих вертикальному обмену теплом и влагой.

Результаты модельных экспериментов

В таблице 1 представлены расчетные результаты чувствительности температуры воздуха и скорости ветра к антропогенным потокам тепла. По сравнению с базовым вариантом модели в модифицированную версию были добавлены антропогенные потоки равные 200 Вт/м^2 , такое значение является близким к максимальным оценкам для выбранного сезона в исследуемом регионе.

Таблица 1

Максимальная разница значений температуры воздуха и скорости ветра между базовым и модифицированным вариантом запуска модели при включении в нее антропогенных потоков тепла

Дата	Время(UTC)	Температура воздуха (° C)		Скорость Ветра (м/с)	
		100 W/m2	200 W/m2	100 W/m2	200 W/m2
30 января 2009 г.	0	1.3	1.97	1.98	3,28
	3	1.3	1.93	2.58	3.14
	6	0.88	1.22	2.46	2.3
	9	0.6	0.92	1.75	1.97
	12	0.52	0.69	1.35	1.63
	15	0.33	0.56	1.11	1.45
	18	0.44	0.65	1.09	1.4
31 января 2009 г.	0	0.42	0.6	1	1.21
	3	0.48	1	0.93	1.34
	6	0.89	1.3	2.14	1.5
	9	1	1.39	2.07	3.24
	12	1.2	1.2	2.04	1.5
	15	0.8	1	1	2.34
	18	0.92	1.27	1.84	1.77
1 февраля 2009 г.	21	1.24	1.47	2.1	2.39
	0	1.36	2.11	2.06	2.14

30 января 2009 года максимальная разница между модифицированным/ базовым запуском равна $1.97 \text{ }^\circ\text{C}$, которая наблюдалась в срок 00 часов, минимум составил $0.47 \text{ }^\circ\text{C}$ в срок 21 час.

31 января ситуация абсолютно противоположная, максимум наблюдался в срок 21 час и равен $1.47 \text{ }^\circ\text{C}$, а минимум составил $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ в срок 00 часов. Такому зеркальному отражению данного распределения максимумов и минимумов способствовала синоптическая ситуация. В ночные часы, а именно в срок 00 часов 30 января наблюдалась изотермия от поверхности земли до уровня 600 м, которая способствовала образованию задерживающих слоев, в результате чего мы видим максимальную разницу. В период с 00 часов 30 января до срока 3 часа 31 января наблюдалось резкое уменьшение температуры, разница составила $4 \text{ }^\circ\text{C}$. 31 января в срок 12 часов наблюдалась приземная инверсия до уровня 950 Гпа, от этого уровня и до 770 Гпа была изотермия, в результате чего мы видим максимальный эффект. Анализируя скорость ветра можно обнаружить что, максимум и минимум значения скорости ветра совпадает со сроками

максимумами и минимумами температуры составляет 3.28 м/с в срок 00 часов 30 января, минимум – 1.22 м/с в срок 21 час. 31 января минимальное уменьшение скорости ветра составило 1.21 м/с в срок 00 часов, 2.39 м/с – максимальное, в срок 21 час.

При запуске версии модели, в которой среднее значение антропогенных потоков тепла равно 100 Вт/м². Максимальная разница температуры воздуха 30 января составила 1.3 °С в срок 00 часов, 31 января максимум был достигнут в срок 21 час и равен 1.24 °С, минимальная – 0.42 °С, для каждого выбранного периода. Необходимо отметить, что с учетом классификации земель, основным источником антропогенных потоков тепла является центральный район города, что хорошо прослеживается при моделировании ситуации.

Для скоростей ветра максимум был равен 1.98 м/с в срок 00 часов 30 января, минимум разницы составил 0.9 м/с. 31 января максимум уменьшения скорости ветра был равен 2.1 м/с. Максимальные и минимальные значения разницы скорости ветра также повторяют ход температуры, как и в предыдущем случае. Что позволяет сделать вывод о том, что антропогенные потоки тепла оказывают влияние и на циркуляцию. Потоки тепла меняют общий нагрев поверхности, уменьшая выхолаживание, соответственно скорость ветра падает. При уменьшении ветра, температура увеличивается.

В последние годы прирост населения в городах существенно возрос. Разрастаясь, города поглощают ближайшие окрестности, постепенно сливаясь друг с другом и образуя городские агломерации. С целью увеличить количество жилых помещений, но при этом занимаемая площадь должна быть минимальной, происходит строительство высотных зданий. Тем самым эффективный параметр шероховатости существенно возрастает. При изменении только значения параметра шероховатости до значения 1 м, Максимальная разница для скорости ветра составила 2.4 м/с, минимальная 0.7 м/с. С уменьшением скорости ветра, температура воздуха увеличивается, связано это с уменьшением оттока тепла, максимальная разница между модифицированным и базовым вариантом для температуры воздуха составила 0.48 °С.

При увеличении параметра шероховатости до 2 м, эффект более ярко выражен, скорость ветра уменьшилась по сравнению с базовым вариантом модели на 3 м/с., температура воздуха увеличилась на 0.65 °С.

Поскольку в реальных условиях термические и динамические урбанизированные эффекты оказывают влияние одновременно, то были произведены запуски модели, при комбинировании всех рассматриваемых эффектов: значение альбедо равно 0.65, параметр шероховатости 2 м, значение антропогенных потоков тепла – 200 Вт/м², а также 100 Вт/м² (рис. 1).

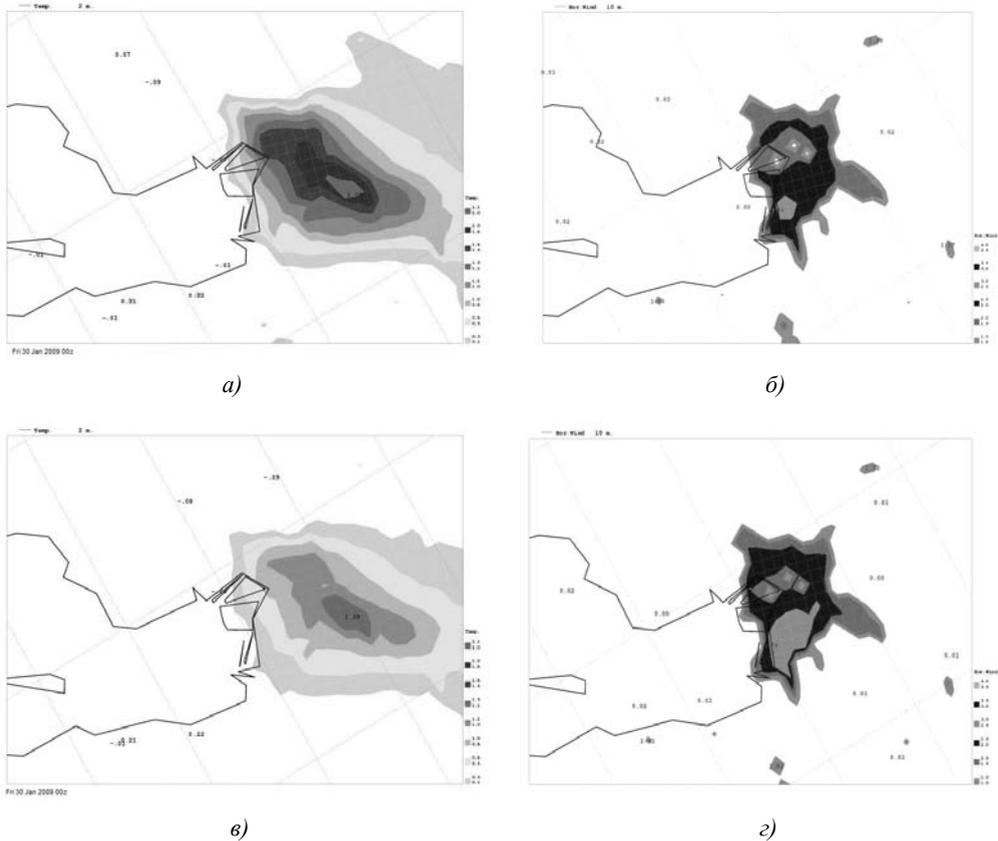


Рис. 1. Разница между базовым и модифицированным вариантом модели в срок 03 часа по Гринвичу 30 января 2009 года при комбинированном эффекте: *а–б* для температуры воздуха и скорости ветра соответственно при значении антропогенных потоков тепла = 200 Вт/м^2 ; *в–г* для температуры воздуха и скорости ветра соответственно при значении антропогенных потоков тепла = 100 Вт/м^2 .

При таком совместном сочетании, максимальная разница температуры при добавлении антропогенных потоков тепла равных 200 Вт/м^2 составила $2.09 \text{ }^\circ\text{C}$, что больше на $0.12 \text{ }^\circ\text{C}$ при проведении экспериментов для версии модели, в которую включены были только антропогенные потоки тепла. Максимальная разница в ветре равна 2.6 м/с , что меньше на 0.7 м/с по сравнению с результатами некомбинированного эксперимента. При таком комбинировании, наблюдается нелинейный эффект, количественное изменение переходит в качественное изменение циркуляции.

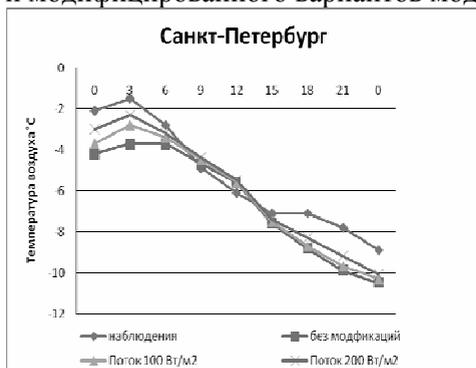
При таком же комбинировании эффектов, но значения антропогенных потоков было равным 100 Вт/м^2 (рис. 1 *в–г*), максимальная разница температуры равна $1.39 \text{ }^\circ\text{C}$, что больше на $0.19 \text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с максимумом, где добавлял-

ся только поток, равный 100 Вт/м^2 . Максимум значения скорости ветра был равен 2.89 м/с , что больше на 0.2 м/с при таком же сравнении. Данное сочетание эффектов, привело к большему увеличению температуры воздуха, так же эффект уменьшения скорости ветра наиболее ярко выражен.

Таким образом, можно сделать вывод, что при выполнении модельных экспериментов, в которых значения исследуемых эффектов урбанизации являются максимальными для выбранного региона, прослеживается нелинейность процессов, при меньших значениях, рассматриваемые эффекты взаимодополняют друг друга, благодаря чему, чувствительность метеорологических параметров возрастает.

Верификация модели

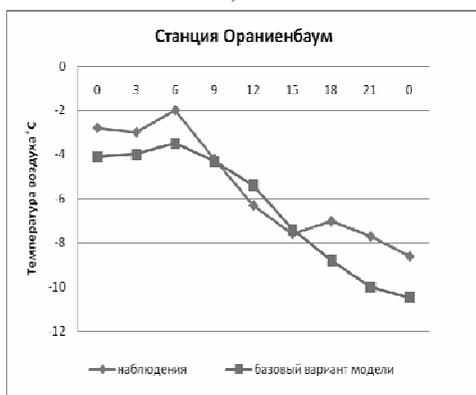
Для того чтобы оценить насколько рассчитываемые в модели метеорологические параметры совпадают с результатами наблюдений, был произведен сравнительный анализ результатов измерения с результатами расчетов базового и модифицированного вариантов модели для Санкт-Петербурга (рис. 2 а–б).



а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Естественный и смоделированный суточный ход для температуры воздуха и скорости ветра соответственно а–б для Санкт-Петербурга; в–г для станции Ораниенбаум (пригород)

Наиболее близкими к реальным наблюдениям оказались расчеты модели при добавленных антропогенных потоков тепла, значение которых составило 200 Вт/м^2 . параметр шероховатости был равным 2 м .

При неплохом, но не идеальном соответствии результатов моделирования и результатов наблюдения, включение эффектов урбанизации позволило улучшить соответствие результатов расчетов и измерений, как в скорости ветра, так и в температуре воздуха.

Так же было произведено сравнения результатов расчетов модели с результатами измерений для пригородов Санкт-Петербурга и неурбанизированных местностей. Анализ результатов измерений с результатами расчетов были выполнены для 9 станций таких как Ораниенбаум (рис. 2 в-г), Кронштадт, Волово, Сосново, Озерки, Шлиссельбург, Выборг. Для пригородов, результаты моделирования, с включенным урбанизированными эффектами и без них совпадают, эффектов урбанизации нет, поэтому результаты базового варианта модели имеют хорошее соответствие с результатами наблюдений.

Заключение

Настоящая работа посвящена исследованию влияния изменчивости потоков тепла в пределах крупного промышленного города на метеорологические условия, как первый шаг учета эффектов урбанизации в интегрированных моделях численного прогноза погоды – изменения качества воздуха.

Получены следующие результаты:

1. Исследования чувствительности метеорологических параметров (температура воздуха, скорость ветра) к антропогенным потокам тепла и к параметру шероховатости показали, что наиболее существенные эффекты оказывали влияние в тот период времени, когда наблюдались слои инверсии или изотермии, что доказывает значимость синоптической ситуации.

2. Эффект влияния антропогенных потоков тепла на температуру связан с изменением скорости ветра. Максимальное уменьшение значения скорости ветра совпадает со сроками максимума увеличения температуры воздуха. Потоки тепла меняют общий нагрев поверхности, уменьшая выхолаживание, соответственно происходит уменьшение скорости ветра.

3. Увеличение эффективного параметра шероховатости приводит к уменьшению скорости ветра, поскольку сопротивление увеличивается, в то-же время происходит увеличение температуры воздуха, так как уменьшается отток тепла.

4. Результаты комбинированного учета исследуемых эффектов показали важность нелинейных эффектов и обратных связей. При выполнении модельных экспериментов, в которых значения исследуемых эффектов урбанизации являются максимальными (200 Вт/м^2 ; 2 м), для выбранного региона прослеживается нелинейность процессов, количественное изменение переходит в качественное, при меньших значениях, рассматриваемые эффекты взаимодополняют друг друга, благодаря чему, чувствительность метеорологических параметров возрастает.

Общий вывод исследования – использование относительно простой схемы учета эффектов урбанизации позволяет улучшить результаты моделирования. Сравнивая полученные результаты урбанизированной версии модели с результатами наблюдений, можно увидеть, что включение эффектов урбанизации позволило улучшить соответствие результатов расчетов и измерений, как в скорости ветра, так и в температуре воздуха.

Литература

1. Голубчиков, С.Н. Экология крупного города (на примере Москвы) [Текст] / В. А. Гутников, И. Н. Ильина, А. А. Минин, Б. Б. Прохоров. – М.: Изд-во Пасьева, 2001. – 189 с.
2. Сладкопеев, С.А. Региональная геоэкология России [Текст] – М.: Изд-во МосГУГиК, 2000. – 158 с.
3. Mahura, A. Verification of long-term DMI-HIRLAM NWP model runs using urbanization and building effect parameterization modules [Text] / C. Petersen, A. Baklanov, B. Amstrup, U.S. Korsholm, K. Sattler // HIRLAM Newsletter. – 2008. – № 53, – P. 50 – 59.
4. Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M. W., 2002: An Urban Surface Exchange Parameterization for Mesoscale Models, *Boundary Layer Meteorology* 104, 261–304.
5. Xiaohua, Y. The DMI-HIRLAM upgrade in June 2004 [Text] / C. Petersen, B. Amstrup, B. S. Andersen, H. Feddersen, M. Kmit, U. Korsholm, K. Lindberg, K. Mogensen, B. H. Sass, K. Sattler, N. W. Nielsen // Technical Report – 2005. – № 09, – 34 P.
6. Unden, P., L. Rontu, H. Järvinen, P. Lynch, J. Calvo, G. Cats, J. Cuhart, K. Eerola, etc. 2002: HIRLAM-5 Scientific Documentation. December 2002, *HIRLAM-5 Project Report*, SMHI.
7. Baklanov, A. Approaches for urbanization of DMI-HIRLAM NWP model [Text] / A. Mahura, N.W. Nielsen, C. Petersen // HIRLAM Newsletter. – 2005. – № 49, – P. 61 – 75.
8. Mahura A., Leroyer S., Mestayer P., Calmet I., Dupont S., Long N., Baklanov A., Petersen C., Sattler K., Nielsen N.W. 2005b: Large Eddy Simulation of Urban Features for Copenhagen Metropolitan Area. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, Vol. 5, pp. 11183–11213.
9. Zilitinkevich, S., Baklanov, A., 2005: An analytical model of the mean-wind and the momentum flux profiles in the urban roughness layer. Ch. 3 in DMI Scientific Report #04-08, ISBN: 87-7478-510-9, pp. 42–46.
10. Grimmond, C.S.B., Oke, T.R. 1999a: Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. *J. Appl. Meteor.*, 38, 922–940
11. Baklanov A., Mestayer, P., Clappier, A., Zilitinkevich, S., Joffre, S., Mahura, A., N.W. Nielsen, 2005a: On the parameterization of the urban atmospheric sublayer in meteorological models. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, Vol. 5, pp. 12119–12176.
12. Baklanov, A. Effects of Urbanized Areas for NWP DMI-HIRLAM High Resolution Model Operational Runs [Text] / A. Mahura, C. Petersen, K. Sattler, N.W. Nielsen // *J. Computational Technologies*. – 2006. – № 11, – P.157 – 16
13. Baklanov, A., A. Rasmussen, B. Fay, E. Berge, and S. Finardi, 2002: Potential and shortcomings of numerical weather prediction models in providing meteorological data for urban air pollution forecasting. *Water, Air and Soil Poll.: Focus*, 2, Urban Air Quality – Recent Advances, pp. 43–60
14. Mahura A., Sattler K., Petersen C., Amstrup B., Baklanov A., 2005a: DMI-HIRLAM Modelling with High Resolution Setup and Simulations for Areas of Denmark. DMI Technical Report 05-12, 45 p.

Данное исследование выполнено с использованием региональной модели численного прогноза погоды Enviro- HIRLAM, которая была предоставлена Датским Метеорологическим Институтом (DMI). Автор выражает благодарность Северо-Западное УГМС за предоставление метеорологических данных для Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Данная работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., а также при финансовой поддержке проектов NetFam (Nordic Network on Fine-scale Atmospheric Modelling), MEGAPOLI.