

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.511.33

**Чувствительность численного прогноза метеорологических
полей к изменению степени урбанизации территории
Санкт-Петербурга**

Е.М. Ладохина^{1–3}✉, К.Г. Рубинштейн^{1, 4}, А.В. Кулюшина^{2, 5*}

¹ Гидрометцентр России

123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

² ООО «МикроСтеп-МИС»

199004, г. Санкт-Петербург, Средний пр. В.О., 4Б, офис 14

³ Северо-Западное УГМС

199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 23-я линия, 2а

⁴ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52

⁵ Удмуртский государственный университет

426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.;

после доработки 8.08.2022 г.;

принята к печати 16.08.2022 г.

Исследуется влияние физических параметров подстилающей поверхности суши в районе Санкт-Петербурга на численный прогноз метеоэлементов. Эксперименты проводились с 14 по 22 июня 2015 г., когда в Санкт-Петербурге наблюдались случаи интенсивного проявления городского острова тепла (ГОТ) — положительная разность температур между городом и сельской местностью. Проведены контрольный эксперимент с параметрами урбанизированной поверхности, заданными по умолчанию, и серии расчетов численной модели с последовательным изменением некоторых из этих параметров, выбранных на основе анализа исследований по схожей тематике. Установлено, что прогностические приземные метеорологические поля чувствительны к изменению влагосодержания почвы, параметра шероховатости, коэффициента тепловой инерции почвы, альбедо и излучательной способности поверхности. В соответствии с результатами экспериментов подготовлен финальный эксперимент — с совместным изменением физических параметров городской поверхности. По расчетам, в прогностические сроки с максимальным проявлением ГОТ разница приземных температур между контрольным и финальным прогнозами достигала 2° для области, соответствующей центру Санкт-Петербурга. Изменение параметров урбанизированной поверхности может оказывать влияние на прогноз метеорологических полей в радиусе до 150 км от центра мегаполиса.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, модель WRF-ARW, Санкт-Петербург, физические параметры подстилающей поверхности, городской остров тепла, numerical weather prediction, WRF-ARW, St. Petersburg, physical parameters of underlying surface, urban heat island.

Введение

Ожидается, что к 2050 г. около 70% населения будет проживать в городах [1]. Отсюда можно предположить, что со временем будет расти число мегаполисов, в том числе в высоких широтах, и будет возрастать потребность в исследованиях влияния урбанизации на погодный режим, включая совершенствование методов численного прогноза метеоэлементов в городской среде. Санкт-Петербург пред-

ставляет собой перспективный объект для изучения и апробации методов оптимального численного прогноза погоды, так как на сегодняшний день он является самым северным мегаполисом в мире [2] с населением свыше 5 млн чел., а сеть метеорологических станций состоит из двух пунктов в черте города и ~ 20 пунктов в ближайших окрестностях. Погодный режим северной столицы характеризуется частой сменой воздушных масс с разными свойствами [3], что, в частности, способствует возникновению большой временной изменчивости полей приземной температуры и влажности в городе [4].

Урбанизация всегда ведет к радикальному изменению природных ландшафтов, что заметно воздействует на локальную погоду [5–7]. Влияние

* Екатерина Михайловна Ладохина (katur.job@mail.ru); Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com); Алла Валерьевна Кулюшина (alla.kulyushina@microstep-mis.com).

урбанизации проявляется, например, в повышении температуры воздуха в центре города [6], увеличении количества осадков в городе [7] и далее по направлению ведущего потока, уменьшении скорости ветра [5, 7]. Положительная разность температур между городом и сельской местностью, известная как городской остров тепла (ГОТ), заметна не только у земли и в деятельном слое почвы, но и до некоторых высот в тропосфере. Изучение ГОТ в различных городах ведется на протяжении многих десятилетий [8]. Для систематизации накопленных результатов регулярно выпускаются обзоры публикаций по этой тематике.

В работе [9] к ключевым факторам формирования ГОТ относят особенности городской подстилающей поверхности. В численных моделях их влияние на атмосферу учитывается с помощью физических параметризаций городского полога — слоя атмосферы, верхней границей которого является средний уровень крыш зданий, нижней — уровень земли. Следует отметить, что городской ландшафт неоднороден; различные его участки в зависимости от плотности городской застройки, доли зеленых насаждений и некоторых других особенностей по-разному взаимодействуют с атмосферой. Поэтому использование параметризации городского полога подразумевает определение специальных параметров урбанизированной поверхности. Набор таких параметров уникален для каждого города.

Цель данной работы — определить диапазоны оптимальных значений физических параметров, урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга. В исследовании анализируется чувствительность метеорологических полей в прогнозах мезомасштабной модели WRF-ARW, где параметры поверхности, соответствующей городу, изменяются в плоской модели *деятельного слоя суши*, сопряженной с WRF-ARW. Публикаций на эту тему для Санкт-Петербурга нам не известно.

Обзор методов исследования чувствительности численного прогноза метеоэлементов в городской среде к изменению параметров подстилающей поверхности

Мезомасштабные численные модели атмосферы, в частности WRF-ARW (США) или COSMO (Германия) (<https://cosmo-model.org>), используются в наибольшем количестве работ по моделированию влияния урбанизации на погодный режим [10] (второе и третье места занимает моделирование с помощью микромасштабных моделей зданий и физических макетов).

На ранних этапах процессы в городском пологе изучались с помощью модификации параметризаций деятельного слоя суши, интегрированных в мезомасштабные численные модели. Поверхность города представлялась как голая почва или плоская плита, а механизмы взаимодействия урбанизированной поверхности с городским пологом ничем не

отличались от механизмов взаимодействия природных поверхностей с пограничным слоем атмосферы.

При использовании модели WRF-ARW этот наиболее простой подход был отражен в ряде работ [11, 12]. В [11] поверхность города моделировалась с помощью изменения специальных параметров в 5-слойной модели термической диффузии [13] (SLAB) [11]. Взаимодействие урбанизированной поверхности с пограничным слоем описывалось теорией подобия Мони́на—Обухова. Предполагалось, что здания и дороги имеют одинаковую температуру, а параметры поверхности для области города косвенно отражают такие особенности городского ландшафта, как, например, высота зданий [14]. В плоской модели область города отличалась от природных поверхностей большим значением параметра шероховатости, меньшими значениями альбедо и излучательной способности, влагосодержания почвы и теплоемкостью. Не учитывался вклад антропогенного потока тепла [11], хотя этот параметр введен в некоторые простые модели города (например, [15]).

Более сложный подход к задаче численного моделирования городского полога состоит в объединении модели городского полога с мезомасштабной численной моделью атмосферы. Первой моделью городского полога такого типа была параметризация энергетического баланса города ТЕВ [16], разработанная с целью восполнить разрыв между мезомасштабными моделями атмосферы и микромасштабными (в масштабах зданий, кварталов) моделями деятельного слоя суши. В параметризации ТЕВ для мезомасштабных моделей атмосферы город был впервые представлен с помощью концепции осредненного [16] уличного каньона [17]; три составляющих теплового баланса (для крыш, стен и дорог) рассчитывались по отдельности. В отличие от более ранних параметризаций того же назначения, физические процессы в слое полога в ТЕВ (коротковолновая радиация, термодинамические и антропогенные взаимодействия, влияние дождя и снега) описаны достаточно полно.

Для совместной работы с WRF-ARW созданы одноуровневая (SLUCM [14]), а позднее и многоуровневая (ВЕР [18]) модели городского полога. SLUCM во многом схожа с моделью ТЕВ. Среди отличий двух параметризаций стоит отметить, что поверхность города в SLUCM может состоять из нескольких различно ориентированных в пространстве уличных каньонов, на тепловой баланс которых влияют суточные изменения азимутального угла солнца. По степени урбанизации местности выделено три типа городского землепользования. Для каждого типа выделено порядка 20 параметров, вариация которых определяет взаимодействие городской застройки с атмосферой.

В модели COSMO (-CLM [19]) реализовано несколько параметризаций городского полога разного уровня сложности. Для описания влияния городской подстилающей поверхности на атмосферу модель COSMO (-CLM) может быть объединена с моделью ТЕВ [20], в то время как описание

процессов в системе «неурбанизированная поверхность – атмосфера» выполняется моделью деятельного слоя суши TERRA [21]. Адаптация параметризации TERRA для моделирования процессов в городском полого получила название TERRA_URB [22]. Она относится к простым моделям городского полого. Характерные процессы городской среды учитываются с использованием полумпирического подхода (SURY) [22], суть которого заключается в трансформации трехмерных параметров модели городского полого в параметры подстилающей поверхности в модели деятельного слоя суши. Это позволило добиться значительной [22] вычислительной эффективности без ущерба качеству прогноза [23].

Параметризация TERRA_URB реализована в рамках численного прогноза погоды высокого разрешения моделью COSMO-Ru для Москвы. Для каждой ячейки сетки, соответствующей урбанизированной поверхности, рассчитываются антропогенный поток тепла, параметр шероховатости, корректируются значения отражательной и излучательной способностей [24]. Свойства урбанизированной поверхности, необходимые для вычисления этих параметров, определялись с помощью оригинального ГИС-ориентированного подхода [25].

С одной стороны, наличие большого количества параметров поверхности позволяет точнее охарактеризовать многообразие городских ландшафтов по всему миру, без внесения дополнительных изменений в саму структуру модели городского полого. С другой, полевые измерения каждого из параметров вряд ли возможны, а подбор их значений на основе анализа результатов численных экспериментов требует значительных вычислительных и временных затрат.

Среди работ, посвященных определению оптимальных параметров урбанизированной поверхности, например, [26–28], важно отметить статью [28]. В ней проведен глобальный (без привязки к конкретному городу/местности) анализ чувствительности прогностических полей атмосферной модели

ко всем возможным параметрам городской поверхности. Он осуществлялся с помощью адаптированного для данной задачи метода Монте-Карло [29]. В результате среди параметров городского полого выделены те, которые в большей степени влияют на прогностические поля атмосферной модели. К ним относятся морфологические характеристики каньона: нормализованные (относительно средней ширины каньона) высота зданий (от 0,2 до 3) и ширина крыш (от 0,3 до 0,8); шероховатость крыш (от 0,1 до 5 мм); доля неурбанизированной территории (от 0 до 0,6); термические параметры крыш: альbedo (от 0 до 1), теплопроводность (от 0,2 до 3 Вт м⁻¹ К⁻¹) и теплоемкость (от 0,1 до 4 МДж м⁻³ К⁻¹) [28]. Излучательная способность крыш варьировалась в пределах от 0,88 до 1. В этом диапазоне отклик прогностических полей был незначительным [28].

Приведенные выше диапазоны вариаций параметров урбанизированной поверхности достаточно широкие. Чтобы определить их более узкие пределы для проведения численных экспериментов, нами проанализирована выборка исследований за последние 20 лет. Значения параметров для некоторых городов [11, 12, 24, 30–34], иллюстрирующие вариации параметров городской поверхности, приведены в табл. 1.

В наибольшем числе исследований альbedo уменьшают вплоть до 0,05, поскольку отражательная способность городских строительных материалов ниже, чем природных поверхностей [5]. Также высокую чувствительность полей модели к изменению альbedo подтверждают работы, посвященные стратегиям уменьшения интенсивности ГОТ. Например, в [35, 36] показано, как изменение значений только отражательной способности городских поверхностей влияет на прогноз интенсивности ГОТ. Увеличение альbedo с 0,2 до 0,8 в [35] (с 0,2 до 0,65; 0,60 и 0,45 в [36]) для поверхностей крыш, стен и дорог в высокоурбанизированных городских районах привело к уменьшению интенсивности ГОТ более чем на 2°. При этом прогностические

Таблица 1

Значения параметров урбанизированной поверхности для некоторых городов

Город	Параметр					Модель городского полого	Δr
	α	H(Z ₀)	k _t (λ)	C _p	ε _s		
Токио [11]	0,15	(0,008)	(3–3,52)	–	0,88	SLAB	4
Афины [12]	0,15	(0,008)	(3,24)	3	–	Noah LCM	2
Москва [24]	0,15	0–50	0,8	1,6	0,86	TERRA-URB	1
Кланг [30]	0,2	8–14	0,67	1,2	0,9	SLUCM	1
Лондон [31]	0,1–0,15	–	0,4–0,8	1–1,5	0,85–0,95	SLUCM	1
Нанкин [32]	0,05	20	1,5	1,75	0,98	SLUCM	1
Нью-Йорк [33]	0,15	5–10(0,01)	1,7	2,1	0,97	SLUCM	0,44
Мадрид [34]	0,2	–	0,695	1,32	0,9–0,95	BEP	0,33
Значение по умолчанию	0,2	5–10	0,67	1	0,9	SLUCM	–
	0,15	0,005	3	1,9	0,88	SLAB	–

Примечание. α – альbedo; H – высота зданий, м; Z₀ – шероховатость крыш, м; k_t – теплопроводность крыш, Вт · м⁻¹ К⁻¹; λ – тепловая инерция поверхности, Дж · м⁻² К⁻¹ с^{1/2}; C_p – объемная теплоемкость, МДж · м⁻³ К⁻¹; ε_s – излучательная способность; Δr – горизонтальный шаг сетки для области города в численной модели, км. Для SLUCM, BEP и TERRA-URB значения α, C_p, ε_s указаны для крыш; для SLAB и Noah LCM значения α, C_p, ε_s даны для урбанизированной поверхности.

приземные температуры снизились не только для участков города с измененным альбедо, но и на прилегающих к ним городских территориях [35]. Излучательная способность поверхности также влияет на приземную температуру воздуха, однако в гораздо меньшей степени, чем альбедо; типичные значения этого параметра в проанализированных исследованиях находятся в диапазоне от 0,85 до 0,98.

Слабый ветер или его отсутствие – основной фактор образования ГОТ [5, 7]. Следовательно, положительные отклонения прогностической скорости ветра могут препятствовать воспроизведению точной величины тепловой аномалии города и привести к появлению отрицательных ошибок прогноза приземной температуры в городе. На величину прогностической скорости ветра в городе влияют высота зданий и шероховатость крыш. В большинстве исследований значения Z_0 увеличивают с 0,005 вплоть до 0,01, значения H – до 20 (или определяют на основе анализа геопространственных данных). Увеличение значений этих параметров может снизить величину положительных ошибок прогноза скорости ветра в городе [36]. Например, в [32] увеличение Z_0 с 15 до 20 м позволило уменьшить положительные отклонения прогнозируемой скорости приземного ветра в 1,5 раза (на 0,5 м/с) и уменьшить отрицательные отклонения приземной температуры.

В одноуровневой модели городского полога параметр теплопроводности для крыши, стен и дорог рассчитывается как $k_t = C_p \cdot k$ [14]. Здесь и далее k – коэффициент теплопроводности ($\text{м}^2 \text{с}^{-1}$). В модели SLAB для этих целей введен параметр тепловой инерции $\lambda = C_p \cdot \sqrt{k}$ [13]. Приведенные формулы для k_t и λ объясняют различия в величине и размерностях двух параметров, характеризующих способность поверхности проводить тепло. В некоторых работах, например [37], отмечается, что тепловая инерция строительных материалов ниже, чем природных поверхностей, однако в большинстве проанализированных исследований этот параметр увеличивают с 3 до 3,52 (с 0,67 до 1,5 в более сложных моделях слоя навеса). В [38] некоторые участки городской поверхности имеют значение $\lambda = 2$, для этих же участков значения влагосодержания почвы минимальны (0,05). Величина объемной (Θ) теплоемкости влияет на изменение температуры поверхности во времени за счет почвенного потока тепла. Значение C_p в исследованиях превосходит значение по умолчанию и задается в диапазонах 1–1,75.

В контексте проблемы определения параметров городской среды широкое распространение получил подход, основанный на концепции локальных климатических зон (ЛКЗ) [39]. Выделение ЛКЗ позволяет охарактеризовать многообразие сочетаний городской застройки и земельного покрова в городах ограниченным числом классов, в пределах которых параметры подстилающей поверхности остаются постоянными. Чтобы набор таких данных мог быть усвоен численной моделью, создана программная платформа WUDAPT [40], использующая

открытые данные о городской среде. Эта платформа позволяет получить карту ЛКЗ с распределением значений параметров урбанизированной поверхности (при наличии данных) для исследования особенностей атмосферного режима в крупных городах. Полученная карта может быть непосредственно усвоена в мезомасштабной численной модели WRF-ARW (в версии 4.3.3 и более поздних) с помощью фреймворка WUDAPT2WRF (W2W) [41].

Постановка численных экспериментов по определению чувствительности прогнозов к изменению параметров урбанизированной поверхности

В этой работе для проведения анализа чувствительности прогностических метеоэлементов к физическим параметрам городской поверхности применялась модель WRF-ARW версии 4.0. В качестве начальных и граничных условий мы использовали поля глобальной прогностической системы GFS (Global Forecast Model) на регулярной сетке с шагом $0,25^\circ$. Для достижения высокого пространственного разрешения применялась процедура динамической детализации (даунскейлинга). Создана базовая расчетная область (домен), покрывающая Балтийское море и часть европейской территории России, с горизонтальным шагом сетки 9 км, в которую встроены промежуточные домены, имеющие большую пространственную детализацию (шаг сетки 3 км). В промежуточный домен, соответствующий Ленинградской области, встроена расчетная область, покрывающая Санкт-Петербург и его ближайшие окрестности, с шагом сетки 1 км (рис. 1). По вертикали задано 46 σ -уровней, из них 17 слоев расположены до уровня 500 гПа.

Для описания мелкомасштабных атмосферных процессов применялись параметризации на основе анализа исследований [42–44] и предварительных численных экспериментов: коротковолновая и длинноволновая радиация – RRTMG [45], микрофизика облаков – Thompson [46], планетарный пограничный слой – MYJ [47]. Параметризация конвекции использовалась только для области с шагом 9 км по схеме Tiedtke [48]. Для описания взаимодействия как природных, так и урбанизированных поверхностей с атмосферой в этой работе применялась модель SLAB, которая значительно проще современных моделей городского полога. С одной стороны, простая модель облегчает постановку численных экспериментов (не требуется подготовки и усвоения в модель карты поверхности Санкт-Петербурга с типами урбанизированных поверхностей), сокращает временные и вычислительные затраты на их проведение, упрощает интерпретацию результатов при комплексном изменении значений параметров поверхности ввиду небольшого количества этих параметров. С другой, модель SLAB не совсем соответствует современному уровню развития моделей городского полога, поэтому в дальнейшем для моделирования метеорологических условий городской

атмосферы планируется использовать одноуровневую модель SLUCM.

На перенос результатов этой работы в дальнейшие эксперименты со SLUCM могут повлиять следующие упрощения: 1) в модели SLAB отсутствует учет изменения альбедо вследствие переотражения радиационных потоков зданиями; 2) влагосодержание почвы не меняется на протяжении всего расчета прогноза. Предполагается, что влияние первого упрощения будет наименьшим для альбедо крыш, к которому поля атмосферной модели наиболее чувствительны. Второе упрощение позволяет проанализировать чувствительность прогностических полей к изменению тепловой инерции и теплоемкости поверхности. В более сложных параметризациях деятельного слоя суши, например Unified Noah LCM [49], сменившей Noah LCM [50], теплопроводность и теплоемкость поверхности не характеризуются с помощью фиксированных параметров и зависят от влагосодержания почвы, величина которого, в свою очередь, также меняется во времени [49].

Точность данных о пространственном распределении параметров поверхности существенно влияет на воспроизведение процессов в приземном слое в численной модели. Чтобы идентифицировать, урбанизирована ячейка сетки или же покрыта лесами, пахотными землями или водой, в модели WRF-ARW предусмотрена возможность усвоения нескольких продуктов, содержащих эту информацию. В разработанной конфигурации использован продукт MODIS IGBP (**M**oderate Resolution **I**maging **S**pectroradiometer land cover defined by the **I**nternational **G**eosphere **B**iosphere **P**rogramme classification scheme) [51]. Он представляет собой набор данных с пространственным разрешением 30'' на основе спутниковой информации спектрометра MODIS, собранной в 2001–2005 гг. Поверхности представлены 20 типами, три из которых характеризуют поверхности, измененные человеком, включая один тип для описания городской среды, 14 используются для описания поверхностей, покрытых характерной для различных регионов пла-

неты растительностью (леса, тундры, поля, саванны и др.), и три типа – для областей без растительности.

Санкт-Петербург окружен в основном вечнозелеными и смешанными лесами. В соответствии с классификацией MODIS IGBP диапазоны значений физических параметров урбанизированной поверхности (тип «Город») и подстилающей, покрытой лесом (тип «Лес»), в модели, различаются. Влагосодержание почвы для типа «Лес» в три раза выше, чем для типа «Город», диапазоны значений излучательной способности выше на 0,05–0,09, тепловой инерции – на $1 \text{ Дж м}^{-2} \text{ К}^{-1} \text{ с}^{-1/2}$, теплоемкости поверхности – на $1\text{--}2 \text{ МДж м}^{-3} \text{ К}^{-1}$. Параметры, служащие непосредственно для описания природных поверхностей (лиственный индекс, глубина залегания корней) для типа «Город» в несколько раз ниже, чем для «Леса». Параметр шероховатости совпадает для обоих типов (равен 0,005 м). Схожи диапазоны значений альбедо (различия составляют порядка 0,02 для конкретных типов «Лес»).

Для численных экспериментов пространственные данные о свойствах поверхности интерполированы на расчетные сетки конфигурации модели с помощью модуля препроцессинга WRF-ARW. Полученные в ходе интерполяции файлы были проанализированы на соответствие расчетного расположения урбанизированных зон фактическому (рис. 1). Районы 1–13, действительно, сильно урбанизированы, тогда как район 14 – курортный – характеризуется обширными зонами растительности. Затем была проведена дополнительная обработка полученных файлов так, чтобы типу поверхности, для которого менялись значения физических параметров, соответствовала только область Санкт-Петербурга во избежание откликов от областей, соответствующих другим городам.

Таким образом в работе проведена оценка чувствительности прогностических полей к изменению параметров городской застройки в плоской модели деятельного слоя суши. Численные эксперименты проведены с 14 по 22 июня 2015 г., когда

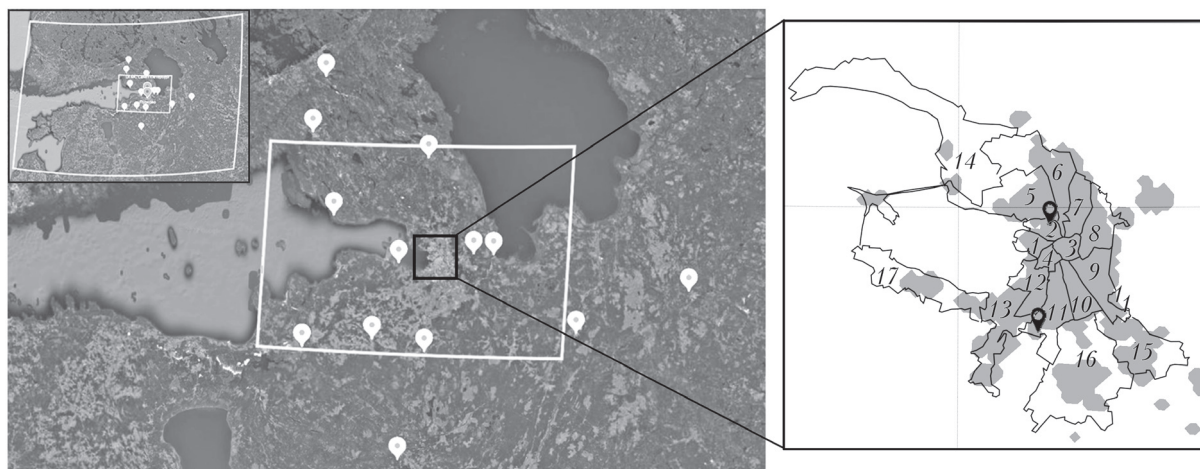


Рис. 1. Границы вложенных областей моделирования и расположение станций с данными наблюдений. Справа показано наложение границ административных районов Санкт-Петербурга на область, для которой изменялись ее свойства в численной модели (черными маркерами обозначены городские станции)

в Санкт-Петербурге наблюдались случаи интенсивного ГОТ по данным станции, отражающей погодный режим города, и фоновых станций [52]. Рассчитывались серии прогнозов за каждый день указанного периода с заблаговременностью 30 ч. Суточные оценки чувствительности получены осреднением статистик за период с 06:00 до 06:00 ВСВ (соответствует заблаговременности прогноза с 6 до 30 ч), ночные – с 18:00 до 06:00 ВСВ (соответствует заблаговременности прогноза с 18 до 30 ч).

Для определения влияния физических параметров поверхности на прогностические поля эксперименты проводились по следующей схеме. Сначала рассчитывается контрольный эксперимент с заданными по умолчанию параметрами за выбранный период времени: $\alpha = 0,15$; $\Theta = 0,1$; $Z_0 = 0,5 \cdot 10^{-2}$; $\lambda = 3,0$; $\epsilon_s = 0,88$. Затем проводится серия экспериментов с последовательным изменением параметров городской застройки: $\alpha = 0,05$; $\alpha = 0,3$; $\Theta = 0,05$; $\Theta = 0,2$; $Z_0 = 1,0 \cdot 10^{-2}$; $\lambda = 4,0$; $\lambda = 2,0$; $\epsilon_s = 0,78$. По результатам анализа чувствительности выбираются параметры, которые в наибольшей мере влияют на поле приземной температуры в городе, и рассчитывается финальный эксперимент с заменой всех выбранных физических параметров на новые.

Количественные оценки для анализа чувствительности получены путем расчета среднего и среднеквадратического отклонений (СО и СКО). Станции с данными измерений разделены на две группы: сельские (Rural) и городские (Urban). В группу сельских станций включено 14 пунктов в радиусе от 25 до 150 км от Санкт-Петербурга; в группу городских станций вошли пункты ОГМС «Санкт-Петербург» и Пулково (рис. 1). Значения прогностических полей в точках сельских станций извлекались из выходных файлов модели для области моделирования с горизонтальным шагом сетки 3 км, в точках городских станций – с шагом сетки 1 км. Выбранные статистические показатели, которые в основном применяются для верификации прогнозов, в данном случае необходимы для оценки изменения отклонений значений прогностических полей при изменении параметров городской застройки. Для этого рассчитаны разности между значениями статистических показателей контрольного эксперимента и экспериментов с измененными параметрами.

Анализ результатов численных прогнозов

Контрольный эксперимент. Итоговые значения статистических показателей для приземной температуры (T2), скорости ветра (W10) и относитель-

ной влажности воздуха (RH2) приведены в табл. 2. Из результатов расчета исключили 21:00 15 июня, поскольку для обеих групп станций наблюдались большие ошибки прогноза температуры (СКО = 6,8 и 4,4° для сельских и городских станций соответственно). Это позволило определить относительно слабое влияние изменения параметров подстилающей поверхности на итоговые значения статистических показателей, особенно в ночные часы. Из анализа СКО следует, что с помощью данной конфигурации модели лучше прогнозируется приземная температура для станций в сельской местности, чем для городских станций. Для обеих групп в прогнозах систематически занижается приземная температура, сильнее – для городских станций, согласно результатам расчета СО.

Результаты предварительного анализа качества прогноза скорости приземного ветра показали, что заметнее завышаются его значения для городских станций, чем для сельских. Согласно предположению, приведенному в [52], в последние годы произошло зарастание молодыми деревьями окрестностей ст. Шлиссельбург (59,93° с.ш., 31,0° в.д.), а при сравнении контрольного эксперимента с данными измерений среднее СКО для этой станции составило 3,3 м/с – на 0,8 м/с больше, чем на других станциях. В связи с этим данные о скорости ветра для Шлиссельбурга исключены из результатов (см. табл. 2) и дальнейшего анализа прогноза скорости ветра.

Суточные ошибки прогноза приземной влажности для сельских станций больше, чем для городских, а ночные – меньше. Из значений СО следует, что в экспериментах систематически завышается относительная влажность для обеих групп станций.

Эксперименты с измененными параметрами поверхности города. Результаты расчета показателей чувствительности прогноза для городских станций (ОГМС «Санкт-Петербург» и Пулково) по данным экспериментов с последовательным изменением параметров городской застройки сведены в табл. 3. Из ее анализа следует, что прогностические метеоэлементы наиболее чувствительны к изменению влагосодержания почвы. При этом как увеличение, так и уменьшение влагосодержания оказывают одинаковое по модулю воздействие на поля температуры и скорости ветра в модели. Однако увеличение влагосодержания (согласно значениям ночных и суточных статистик) значительно сильнее влияет на поле влажности воздуха, чем его уменьшение. Уменьшение влагосодержания способствует росту прогностической приземной

Таблица 2

Статистические оценки контрольных прогнозов

Группа	Сутки						Ночь					
	T2		W10		RH2		T2		W10		RH2	
	СО	СКО	СО	СКО	СО	СКО	СО	СКО	СО	СКО	СО	СКО
Городская	-1,14	1,84	1,98	2,51	7,99	9,99	-1,59	2,08	1,86	2,23	10,19	11,94
Сельская	-0,76	1,83	1,94	2,42	7,41	11,78	-0,44	1,79	1,77	2,25	6,95	11,75

температуры воздуха, увеличению скорости приземного ветра и уменьшению влажности приземного воздуха в городе. Поскольку большинство городских поверхностей влагонепроницаемо (дороги и стены), а излишки влаги быстро удаляются системами городской канализации, в то время как естественные поверхности хорошо сохраняют влагу, полученный результат можно интерпретировать как высокую чувствительность прогностических полей к доле урбанизированной поверхности в ячейке.

Увеличение альбедо с 0,15 до 0,3 сильнее влияет на поле приземной температуры в городе (способствуя понижению температуры), чем уменьшение этого параметра. Также наблюдается заметные изменения в поле приземной влажности при изменении альбедо: рост влажности при увеличении альбедо выше, чем ее снижение при уменьшении этого параметра. Изменения скорости приземного ветра одинаковы по модулю: увеличение альбедо способствует небольшому уменьшению скорости приземного ветра в городе и наоборот. Большая продолжительность светового дня обеспечивает чувствительность прогностических полей к изменению альбедо и в ночные часы.

В ночные часы наибольшее влияние на изменение полей метеоэлементов оказало увеличение параметра шероховатости с $0,5 \cdot 10^{-2}$ до $1,0 \cdot 10^{-2}$. Это увеличение ожидаемо вызвало наибольшее ослабление приземного ветра по сравнению с экспериментами, где изменялись другие параметры. Заметны изменения и в поле приземной влажности: ее значение уменьшилось на 0,66% по сравнению с контрольным экспериментом. Достаточно слабо влияет увеличение параметра шероховатости на поле приземной температуры: в ночные часы наблюдается ее небольшое увеличение, которое компенсируется слабым уменьшением в дневные часы, так что $\Delta_{\text{СКО}} = 0$.

Наиболее чувствительным к изменению тепловой инерции поверхности оказалось поле приземной влажности. При этом в ночные часы уменьшение λ с 3 до 2 ведет к большим отклонениям при-

земной влажности от контрольного эксперимента в сравнении с экспериментом, где $\lambda = 4$. Ночное увеличение влажности при уменьшении тепловой инерции компенсируется днем, и итоговое суточное увеличение влажности, в сравнении с контрольным экспериментом, невелико. Эти же закономерности справедливы для поля приземной температуры с той разницей, что в ночные часы при уменьшении тепловой инерции приземная температура в районах городских станций также уменьшилась, а днем этот эффект практически полностью компенсировался увеличением приземной температуры, так что суточное отклонение от контрольного эксперимента оказалось невелико.

Таким образом, уменьшение λ способствует увеличению амплитуды колебаний приземной температуры в течение суток, отражая быстрый теплообмен с атмосферой, характерный для урбанизированной поверхности. Более высокое значение этого параметра уменьшает амплитуду колебаний приземной температуры и, как следствие, разница между ночными и дневными отклонениями температуры в сравнении с контрольным экспериментом невелика. Поскольку в плоской модели деятельного слоя суши, использованной для анализа чувствительности, тепловая инерция напрямую зависит от теплоемкости ($\lambda = C_p \sqrt{k}$), предполагается, что полученные оценки чувствительности прогностических полей к изменению тепловой инерции справедливы и для объемной теплоемкости.

Согласно [28] вариация излучательной способности в пределах 0,88–1 не оказала значимого влияния на прогностические поля численной модели. В данной работе излучательная способность уменьшена до 0,78, что привело к небольшому росту температуры и слабому увеличению скорости приземного ветра по сравнению с контрольным экспериментом. Уменьшение параметра также повлияло на поле приземной влажности – влажность воздуха в городе уменьшилась. В использованной плоской модели уменьшение излучательной способности отражает процесс задержки городскими

Таблица 3

Разности статистических оценок контрольного эксперимента и прогнозов с измененными параметрами (городские станции)

Параметр	Сутки						Ночь					
	T2		W10		RH2		T2		W10		RH2	
	Δ_{CO}	$\Delta_{\text{СКО}}$	Δ_{CO}	$\Delta_{\text{СКО}}$	Δ_{CO}	$\Delta_{\text{СКО}}$	Δ_{CO}	$\Delta_{\text{СКО}}$	Δ_{CO}	$\Delta_{\text{СКО}}$	Δ_{CO}	$\Delta_{\text{СКО}}$
$\alpha = 0,05$	-0,13	0,06	-0,13	-0,08	0,69	0,38	-0,08	0,02	-0,15	-0,06	0,33	0,20
$\alpha = 0,3$	0,25	-0,17	0,09	0,09	-0,90	-0,79	0,18	-0,13	-0,05	-0,03	-0,76	-0,65
$\Theta = 0,05$	-0,16	0,08	-0,10	-0,09	1,08	0,70	-0,13	0,08	-0,12	-0,12	0,72	0,53
$\Theta = 0,2$	0,19	-0,08	0,07	0,10	-1,67	-1,15	0,15	-0,06	0,01	0,04	-1,17	-0,91
$Z_0 = 1$	-0,04	0	0,28	0,25	0,48	0,39	-0,10	0,04	0,16	0,14	0,68	0,66
$\lambda = 4$	0,05	-0,03	0,02	0,05	-0,14	-0,12	-0,04	0,01	-0,08	-0,02	-0,05	0,06
$\lambda = 2$	0,04	-0,03	-0,06	-0,07	0,01	-0,14	0,18	-0,14	-0,10	-0,09	-0,70	-0,62
$\varepsilon_s = 0,78$	-0,06	0,02	-0,03	-0,02	0,33	0,19	-0,08	0,01	-0,08	-0,07	0,20	0,16

Примечание. Δ_{CO} и $\Delta_{\text{СКО}}$ – разности значений статистик контрольного эксперимента и экспериментов с измененными параметрами.

каньонами излученной части солнечной радиации, однако в более сложных параметризациях городского полога, например SLUCM, этот процесс учтен явно и вносить изменения не требуется.

Финальный комплексный эксперимент

Данный эксперимент подразумевает анализ чувствительности к комплексному изменению параметров поверхности. Наиболее интересным представляется оценка влияния комплексного изменения параметров на поле приземной температуры в городе и, следовательно, на ГОТ. Для этого из табл. 3 выбраны параметры, при которых в новых экспериментах температура в городе увеличилась по сравнению с контрольным экспериментом: $\alpha = 0,05$; $\Theta = 0,05$; $Z_0 = 1,0 \cdot 10^{-2}$; $\epsilon_s = 0,78$. Просуммировав значения $\Delta_{\text{СКО}}$ из табл. 3, ожидается, что приземная температура в пределах города увеличится, а относительная влажность — уменьшится. Отклонения от данных измерений с городских станций уменьшатся на $0,16^\circ$ и $1,66\%$ соответственно. Предполагается, что влияние увеличенного параметра шероховатости на скорость приземного ветра компенсирует воздействие от изменения остальных параметров. Ожидается, что скорость приземного ветра незначительно возрастет: СКО увеличится на $0,06$ м/с по сравнению с контрольным экспериментом.

Показатели чувствительности приземных прогностических полей к изменению параметров поверхности города по результатам финального эксперимента приведены в табл. 4. Чувствительность

приземной температуры к изменению параметров поверхности оказалась выше предполагаемой: в среднем за сутки СКО уменьшилось на $0,2^\circ$ по сравнению с контрольным экспериментом, ночью — на $0,25^\circ$. Чувствительность поля относительной влажности оказалась ниже ожидаемого значения: осредненное за сутки СКО в сравнении с контрольным экспериментом уменьшилось на $1,46\%$. Как и для приземной температуры, чувствительность прогноза относительной влажности к изменению параметров выше ночью, чем днем, согласно разности $\text{СКО}_{\text{контр}} - \text{СКО}_{\text{финал}} = 2,03\%$. Скорость приземного ветра в городе не увеличилась, а количественно отклонение прогностической скорости приземного ветра в среднем за сутки уменьшилось на $0,15$ м/с по сравнению с контрольным экспериментом.

Таким образом, на основе оценки результатов последовательного изменения параметров городской поверхности в модели удалось довольно точно предсказать количественное изменение СКО чувствительности прогноза для финального эксперимента.

Прогноз ГОТ. Относительно небольшая чувствительность приземной температуры к изменению параметров подстилающей поверхности по данным осредненных статистик может быть более значительной в отдельные сроки. Чтобы это выяснить, мы проанализировали разности температур между городом и сельской местностью (рис. 2), рассчитанные по данным ОГМС «Санкт-Петербург» и фоновой ст. Белогорка (согласно [53, 54]). Прогностические значения температуры в мегаполисе по результатам контрольного и финального экспериментов

Таблица 4

Статистические оценки прогноза приземных метеоэлементов по результатам контрольного и финального экспериментов (городские станции)

Эксперимент	Сутки						Ночь					
	T2		W10		RH2		T2		W10		RH2	
	CO	СКО	CO	СКО	CO	СКО	CO	СКО	CO	СКО	CO	СКО
Контр.	-1,16	1,86	1,98	2,51	7,99	9,99	-1,59	2,08	1,86	2,23	10,19	11,94
Финал	-0,79	1,67	1,83	2,34	5,43	8,54	-1,13	1,83	1,79	2,14	7,51	9,91

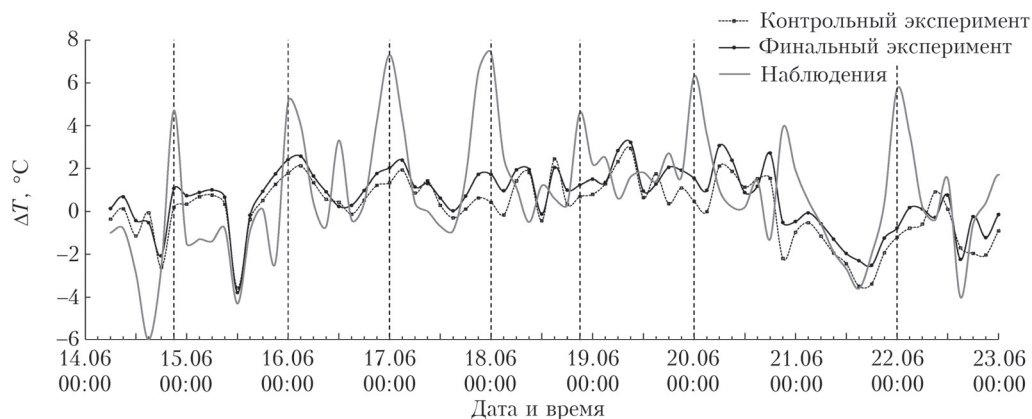


Рис. 2. Временной ход разности приземных температур в городе и сельской местности по данным наблюдений ($\Delta T_{\text{факт}}$) и результатам контрольного ($\Delta T_{\text{контр}}$) и финального ($\Delta T_{\text{финал}}$) экспериментов

получены осреднением значений в точках сетки в 5-километровой окрестности центра города. Изменение параметров поверхности города оказало наибольшее влияние на прогноз температуры при наличии ГОТ высокой интенсивности, которые отмечены на графике вертикальными пунктирными линиями. Максимальная разница температур в области города между финальным и контрольным экспериментами наблюдается в ночь с 17 на 18 июня – 1,3° и 19 июня (18 ВСВ) – 1,6°.

Однако наиболее полную оценку влияния изменения параметров подстилающей поверхности на приземную тепловую аномалию города дает рассмотрение пространственной структуры ГОТ. Пространственное распределение температуры представлено в виде разницы ее полей по данным финального и контрольного экспериментов (рис. 3). В ночные часы (с 21:00 до 03:00 ВСВ) 15–18 июня температурная аномалия развивалась в пределах и в ближайших окрестностях Санкт-Петербурга, достигая 2° в некоторых районах города, при этом поле температуры в сельской местности в финальном эксперименте практически не изменилось. В ночные часы 20 и 22 июня тепловая аномалия не локализована: отклонения температуры наблюдались не только в области, соответствующей городу, но и на всей расчетной сетке модели. Анализ синоптической ситуации показал, что в этот период погоду в Санкт-Петербурге и окрестностях определяло малоградиентное поле давления со слабым неустойчивым ветром (до 2–3 м/с) и малой облачностью. Эти условия являются особенно благоприятными для развития ГОТ, поэтому изменение параметров, к которым поле приземной температуры наиболее чувствительно, привело к распространению отклонений температуры далеко за пределы мегаполиса.

В связи с обнаружением отклонений температуры на всей расчетной области проведена оценка влияния изменения параметров городской поверхности на прогноз метеоэлементов для сельских станций. Согласно разности статистик СКО для контрольного и финального экспериментов это влияние прослеживается вплоть до окрестностей ячейки сетки, соответствующей самой удаленной (150 км) от Санкт-Петербурга станции с данными измерений (Лодейное Поле). Например, в срок 18:00 ВСВ 22 июня разность $СКО_{\text{контр}} - СКО_{\text{финал}} = 1,3^\circ$.

Заключение

В работе проведена оценка чувствительности приземных прогностических полей температуры, скорости ветра и влажности воздуха к изменению физических параметров урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга. Приведен обзор методов исследования чувствительности численного прогноза метеоэлементов в городской среде к изменению параметров подстилающей поверхности; определены набор параметров, к которым прогностические поля мезомасштабной модели наиболее чувствительны, и диапазон вариации этих параметров по данным современных исследований.

Анализ экспериментов с последовательной вариацией параметров урбанизированной поверхности в плоской модели SLAB показал, что приземные прогностические поля чувствительны к изменению влагосодержания почвы в диапазонах от 0,05 до 0,2, альбедо – от 0,05 до 0,3, тепловой инерции – от 2 до 4, увеличению параметра шероховатости с $0,5 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-2}$, уменьшению параметра излучательной способности с 0,88 до 0,78. На основе оценки результатов последовательного изменения параметров городской застройки в модели

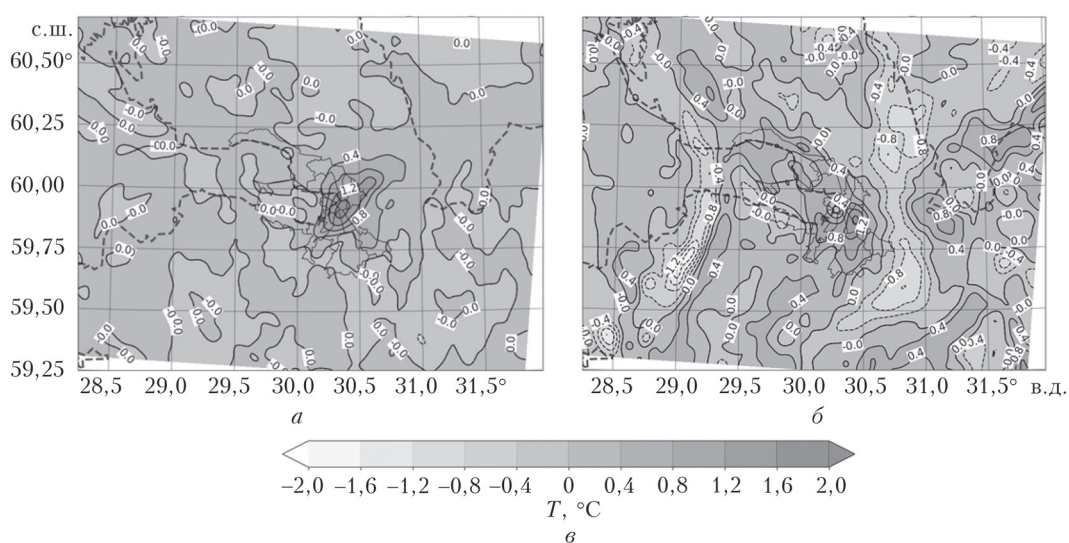


Рис. 3. Разность полей температур между контрольным и финальным экспериментами: а – 01:00 18 июня, б – 21:00 22 июня 2015 г.

удалось довольно точно предсказать количественное изменение статистических показателей чувствительности прогноза для финального комплексного эксперимента с одновременным изменением тех параметров, которые способствовали росту приземной температуры над городом.

Наибольшие изменения в поле приземной температуры над городом по результатам финального эксперимента, вплоть до 2°, происходили ночью в моменты интенсивного развития острова тепла. При определенных синоптических условиях изменение параметров городской поверхности повлияло на прогноз метеоэлементов на всей расчетной области. В частности, когда погода у земли определялась малоградиентным полем давления с неустойчивыми направлениями ветра, изменение параметров урбанизированной поверхности в модели повлияло на прогноз метеоэлементов в радиусе до 150 км от центра мегаполиса.

Предполагается применение результатов настоящей работы в дальнейшем для улучшения качества численного прогноза погоды в Санкт-Петербурге с помощью одноуровневой модели городского полога SLUCM, интегрированной в WRF-ARW. Для адекватной работы параметризации поверхность Санкт-Петербурга будет классифицирована по типам, в соответствии с которыми будет построена карта городского землепользования с учетом горизонтального шага сетки в разработанной конфигурации модели. Оптимальная точность прогноза будет достигнута путем вариации физических параметров модели городского полога в определенных в этой работе диапазонах. Надеемся, что введение в модель параметризации городского полога с картой типов урбанизированных поверхностей позволит воспроизвести влияние урбанизации на прогноз метеоэлементов в различных районах города, изучить особенности взаимодействия городского полога с пограничным слоем атмосферы и особенности зимнего ГОТ в самом северном мегаполисе.

Список литературы

1. *United Nations*, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects 2019 (medium-fertility variant). New York, 2022. URL: <https://worldometers.info/world-population/world-population-projections> (last access: 10.01.2022).
2. *United Nations*, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects 2018. New York, 2022. URL: <https://population.un.org/wup/Maps> (last access: 10.01.2022).
3. *Климат* Ленинграда / Ц.А. Швер (ред.). Л.: Гидрометеоздат, 1982. 252 с.
4. *Морозова С.В.* Статистическое исследование волн тепла и холода в Северо-Западном регионе зимой и летом (на примере Санкт-Петербурга) // Уч. зап. Рос. гос. гидромет. ун-та. 2014. № 36. С. 50–53.
5. *Оке Т.Р.* Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 360 с.
6. *METROMEX: A Review and Summary* / Changnon S. (ed.). Springer, 2016. 181 p.
7. *Ландсберг Г.Е.* Климат города. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 248 с.
8. *Gartland L.M.* Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas. England: Routledge, 2012. 208 p.
9. *Deilami K., Kamruzzaman M., Liu Y.* Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures // *Int. J. Appl. Earth Obs.* 2018. N 67. P. 30–42.
10. *Kim S.W., Brown R.D.* Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review // *Sci. Total Environ.* 2021. N 779. P. 146–389.
11. *Kusaka H., Chen F., Tewari M., Dudhia J., Gill D.O., Duda M.G., Wang W., Miya Y.* Numerical simulation of urban heat island effect by the WRF model with 4-km grid increment: An inter-comparison study between the urban canopy model and slab model // *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II.* 2012. N. 90. P. 33–45.
12. *Giannaros T.M., Melas D., Daglis I.A., Keramitsoglou I., Kourtidis K.* Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model // *Atmos. Environ.* 2013. N 73. P. 103–111.
13. *Dudhia J.* A multi-layer soil temperature model for MM5. Preprints // The Sixth PSU/NCAR mesoscale model users' workshop (Boulder, CO, USA). 1996. P. 22–24.
14. *Kusaka H., Kondo H., Kikegawa Y., Kimura F.* A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2001. V. 101, N 3. P. 329–358.
15. *Taha H.* Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk-parameterization approach // *J. Appl. Meteorol.* 1999. V. 38, N 4. P. 466–473.
16. *Masson V.* A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2000. V. 94, N 3. P. 357–397.
17. *Nunez M., Oke T.R.* The energy balance of an urban canyon // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 1977. V. 16, N 1. P. 11–19.
18. *Salamanca F., Martilli A.* A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations – Part I (II). Validation with one dimension off-line simulations // *Theor. Appl. Climatol.* 2010 V. 99, N 3. P. 345–356.
19. *Rockel B., Will A., Hense A.* The regional climate model COSMO-CLM (CCLM) // *Meteorol. Z.* 2008. V. 17, N 4. P. 347–348.
20. *Trusilova K., Früh B., Brienen S., Walter A., Masson V., Pigeon G., Becker P.* Implementation of an urban parameterization scheme into the regional climate model COSMO-CLM // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2013. V. 52, N 10. P. 2296–2311.
21. *Doms G., Baldauf M.* A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO Model. Part II: Physical Parameterization. Offenbach: Deutscher Wetterdienst, 2011. 154 p.
22. *Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., van Lipzig N.P.* The efficient urban canopy dependency parameterization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: Description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9, N 9. P. 3027–3054.
23. *Garbero V., Milelli M., Bucchignani E., Mercogliano P., Varentsov M., Rozinkina I., Rivin G., Blinov D., Wouters H., Schulz J.-P., Schättler U.,*

- Bassani F., Demuzere M., Repola F.* Evaluating the urban canopy scheme TERRA_URB in the COSMO model for selected European cities // *Atmosphere*. 2021. V. 12, N 2. P. 237–261.
24. *Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И.* Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // *Вестн. МГУ*. 2017. Т. 5, № 6. С. 25–37.
25. *Самсонов Т.Е., Варенцов М.И.* Определение параметров городской среды Московского мегаполиса для детализированного численного прогноза погоды в рамках модели COSMO // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 7. С. 112–119.
26. *Nemunaitis-Berry K.L., Klein P.M., Basara J.B., Fedorovich E.* Sensitivity of predictions of the urban surface energy balance and heat island to variations of urban canopy parameters in simulations with the WRF model // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2017. V. 56, N 3. P. 573–595.
27. *Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M.* Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment // *Atmosphere*. 2020. V. 11, N 12. P. 1349.
28. *Wang Z.H., Bou-Zeid E., Au S.K., Smith J.A.* Analyzing the sensitivity of WRF's single-layer urban canopy model to parameter uncertainty using advanced Monte Carlo simulation // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2011. V. 50, N 9. P. 1795–1814.
29. *Au S.K., Beck J.L.* Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation // *Probabilist. Eng. Mech.* 2001. V. 16, N 4. P. 263–277.
30. *Morris K.I., Chan A., Morris K.J.K., Ooi M.C., Oozeer M.Y., Abakr Y.A., Nadzir M.S.M., Mohamed I.Y.* Urbanisation and urban climate of a tropical conurbation, Klang Valley, Malaysia // *Urban Clim.* 2017. N 19. P. 54–71.
31. *Loridan T., Lindberg F., Jorba O., Kotthaus S., Grossman-Clarke S., Grimmond C.S.B.* High resolution simulation of the variability of surface energy balance fluxes across central London with urban zones for energy partitioning // *Bound-Lay. Meteorol.* 2013. V. 147, N 3. P. 493–523.
32. *Chen L., Zhang M., Wang Y.* Model analysis of urbanization impacts on boundary layer meteorology under hot weather conditions: A case study of Nanjing, China // *Theor. Appl. Climatol.* 2016. V. 125, N 3. P. 713–728.
33. *Holt T., Pullen J.* Urban canopy modeling of the New York City metropolitan area: A comparison and validation of single- and multilayer parameterizations // *Mon. Weather Rev.* 2007. V. 135, N 5. P. 1906–1930.
34. *Salamanca F., Martilli A., Yague C.* A numerical study of the urban heat island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies // *Int. J. Climatol.* 2012. V. 32, N 15. P. 2372–2386.
35. *Morini E., Touchaei A.G., Castellani B., Rossi F., Cotana F.* The impact of albedo increase to mitigate the urban heat island in Terni (Italy) using the WRF model // *Sustainability*. 2016. V. 8, N 10. P. 1–14.
36. *Jandaghian Z., Akbari H.* The effect of increasing surface albedo on urban climate and air quality: a detailed study for Sacramento, Houston, and Chicago // *Climatology*. 2018. V. 6, N 2. P. 1–19.
37. *Barlage M., Miao S., Chen F.* Impact of physics parameterizations on high resolution weather prediction over two Chinese megacities // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 9. P. 4487–4498.
38. *Lam J.S.L., Lau A.K.H., Fung J.C.H.* Application of refined land-use categories for high resolution mesoscale atmospheric modelling // *Bound-Lay. Meteorol.* 2006. V. 119, N 2. P. 263–288.
39. *Stewart I.D., Oke T.R.* Local climate zones for urban temperature studies // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2012. V. 93, N 12. P. 1879–1900.
40. *Ching J., Mills G., Bechtel B., See L., Feddema J., Wang X., Ren C., Brousse O., Martilli A., Neophytou M., Mouzourides P., Stewart I., Hanna A., Ng E., Foley M., Alexander P., Aliaga D., Niyogi D., Shreevasta A., Bhalachandran P., Masson V., Hidalgo J., Fung J., Andrade M., Baklanov A., Dai W., Milcinski G., Demuzere M., Brunzell N., Pesaresi M., Miao S., Mu Q., Chen F., Theeuwes N.* WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene // *B. Am. Meteorol. Soc.* 2018. V. 99, N 9. P. 1907–1924.
41. *Zonato A., Martilli A., Di Sabatino S., Zardi D., Giovannini L.* Evaluating the performance of a novel WUDAPT averaging technique to define urban morphology with mesoscale models // *Urban Clim.* 2020. V. 31. P. 100584
42. *Chen F., Dudhia J.* Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity // *Mon. Weather Rev.* 2001. V. 129, N 4. P. 569–585.
43. *Tewari M., Chen F., Wang W., Dudhia J., LeMone M.A., Mitchell K., Ek M., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H.* Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model (Formerly Paper Number 17.5) // 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, 2004. V. 14. P. 11–15.
44. *Мостаманди С.В., Тарабукин И.А., Дорофеев Е.В.* Развитие технологий сверхкраткосрочных и краткосрочных прогнозов опасных метеорологических явлений на основе анализа данных наблюдений и результатов численного прогноза гидродинамической модели WRF // *Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2015. № 579. С. 178–204.
45. *Смирнова М.М., Рубинштейн К.Г., Юшков В.П.* Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы // *Метеорол. и гидрол.* 2011. № 12. С. 5–16.
46. *Торопова М.Л., Русин И.Н.* Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW // *Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2019. № 593. С. 160–176.
47. *Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D.* Radiative forcing by long lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2008. V. 113, N 13. P. 22.
48. *Thompson G., Field P.R., Rasmussen R.M., Hall W.D.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization // *Mon. Weather Rev.* 2008. V. 136, N 12. P. 5095–5115.
49. *Janjic Z.I.* The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes // *Mon. Weather Rev.* 1994. V. 122. P. 927–945.
50. *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 // *Mon. Weather Rev.* 2011. V. 139, N 11. P. 3489–3513.
51. *Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114, N 1. P. 168–182.
52. *Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г.* Анализ влияния мегаполиса Санкт-Петербург на осадки и ветер для валидации численного прогноза погоды // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 1. С. 36–45; *Ladokhina E.M., Rubinshtein K.G.* Analysis of the effect of the St. Petersburg megalopolis on precipitation and wind for validation of numerical weather forecasts // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 3. P. 239–249.
53. *Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л.* Облака и вихри — основа колебаний погоды и климата. СПб.: РГГМУ, 2005. 327 с.
54. *Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Целев В.Ю.* Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе // *Гидромет. исслед. и прогнозы.* 2020. № 2. С. 109–125.

E.M. Ladokhina, K.G. Rubinshtein, A.V. Kulyushina. **Sensitivity of the numerical weather forecast fields to the variations in St. Petersburg surface parameters.**

The influence of physical parameters, which describe the St. Petersburg surface properties in the WRF-ARW model, on the forecast of surface meteorological elements is studied. The results are estimated for the cases June 14–22, 2015, when intense positive temperature anomaly occurred in St. Petersburg in comparison with the surroundings. The parameters were chosen from the analysis of similar studies for several cities of the world. Experiments with serial variations in the parameters selected showed that decrease in the surface albedo, soil moisture content, and surface emissivity and an increase in the roughness length improved the forecast quality for the city in comparison with a control experiment. In final experiment, the concurrent variations in the urban surface physical parameters, in accordance with the results of serial experiments, significantly improved the simulation of the city's thermal anomaly in the model. In the time periods corresponding to the intense urban heat island occurrence, the difference in the surface temperatures between the control and final forecasts could attain 2 °C for the St. Petersburg model area. Under certain synoptic conditions, the variations in the urban surface parameters in the model affect the forecast of meteorological fields within a radius of 150 km from the center of the metropolis.