

УДК 551.51

ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ С ГОРОДСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ: ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© 2023 г. М. А. Тарасова^{a, b, c, e, *}, М. И. Варенцов^{a, b, c, d, e, **}, В. М. Степаненко^{a, c, e, ***}

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

^bГидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации,
Большой Предтеченский пер., д. 13, строение 1, Москва, 123376 Россия

^cМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, Москва, 119234 Россия

^dИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, Москва, 119017 Россия

^eМосковский центр фундаментальной и прикладной математики, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: mkolennikova@mail.ru

**e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

***e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Поступила в редакцию 04.11.2022 г.

После доработки 25.12.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2023 г.

Город оказывает значительное воздействие на окружающую среду, формируя такие микроклиматические особенности как городской остров тепла, усиление интенсивности конвективных метеорологических явлений и др. эффекты. Численные модели прогноза погоды с блоком описания взаимодействия урбанизированных поверхностей с атмосферой — городской параметризацией — в целом успешно воспроизводят метеорологические особенности городского пограничного слоя. К настоящему времени обзорные статьи, обобщающие сведения по параметризациям городской поверхности, по большей части уже устарели, либо не в полной мере охватывают аспекты используемых в моделях методов описания отдельных физических процессов. Работа посвящена актуализации существующих обзоров городских параметризаций, сравнению используемых подходов к описанию процессов энерго- и массообмена урбанизированных территорий с атмосферой и формированию предложений по их улучшению. Выделены основные группы физических процессов, учитываемых при описании взаимодействия между городской поверхностью и атмосферой, — тепловой баланс поверхности, радиационный теплообмен поверхности с атмосферой, баланс влаги на поверхности, турбулентный тепло- и влагообмен в городском подслое, антропогенные источники тепла и влаги. Изложены основные подходы к параметризации физических процессов, определенных в рамках каждого блока. Сформулированы современные тенденции развития городских параметризаций: 1) последние 10 лет наблюдается усложнение параметризаций за счет добавления новых физических механизмов: процессов переноса тепла и его источников внутри зданий, трехмерной структуры городской растительности; вводится явное вертикальное разрешение при расчете турбулентных потоков и основных метеорологических величин; 2) существенно меньше внимания уделяется пересмотру устаревших эмпирических формул, часто полученных на основе единичных натурных или лабораторных экспериментов. Предложены пути улучшения городских параметризаций за счет уточнения базовых зависимостей, используемых главным образом при расчете турбулентных потоков, в частности, с помощью результатов вихреразрешающего моделирования городского пограничного слоя, которое с ростом вычислительных мощностей все чаще используется для явного моделирования обмена теплом и импульсом между атмосферой и элементами городской среды.

Ключевые слова: городская метеорология, параметризации, модели атмосферы

DOI: 10.31857/S0002351523020062, **EDN:** HPPHSS

ВВЕДЕНИЕ

С середины XX века наблюдаются ускоренные темпы урбанизации. По прогнозам к 2050 году более двух третей населения мира будет проживать в

городах [UN, 2018]. Города являются центрами сосредоточения населения, инфраструктуры, и очагами наиболее интенсивного воздействия человека на окружающую среду. В частности, изменение свойств подстилающей поверхности и ан-

тропогенные эмиссии определяют значительные изменения городского климата по сравнению с окружающими сельскими и естественными ландшафтами. Одной из характерных особенностей городского климата является эффект городского острова тепла [Rizwan et al., 2008; Oke et al., 2017]. В крупных городах разность температуры воздуха между центром и пригородом при благоприятных условиях может достигать более 10°C. Такой эффект может быть особо опасен летом во время продолжительных волн жары, так как приводит к усилению теплового стресса и рисков для здоровья жителей [Wong et al., 2013; Zemtsov et al., 2021]. Среди других эффектов можно отметить влияние городов на развитие опасных явлений погоды конвективной природы, включая интенсивные осадки и грозы [Bornstein and Lin, 2000; Han et al., 2014; Liu and Niyogi, 2019]. На фоне роста запросов населения на комфортную и безопасную городскую среду, одной из приоритетных задач метеорологии становится развитие методов моделирования метеорологического режима городов. Это важно как для повышения точности прогноза погоды и климата, так и для корректного учета метеорологических факторов в задачах градостроительного планирования с конечной целью повышения комфортности городской среды.

Для получения более надежных прогнозов погоды и климата важно корректно задавать граничные условия в численных моделях атмосферы, в частности, нижние граничные условия, определяемые режимом взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности — потоки импульса, тепла, влаги, радиационные потоки. За последние годы пространственное разрешение моделей атмосферы существенно улучшилось. Шаг сетки климатических моделей уменьшился с сотен километров до примерно 100 км и менее [Rummukainen, 2016]. Разрешение глобальных моделей прогноза погоды всех ведущих метеорологических центров составляет 9–13 км, региональных 1–2 км и менее [Ривин и др., 2019], а в исследовательском режиме ведутся расчеты с шагами сетки в первые сотни метров [Mussetti et al., 2020a, b; Rivin et al., 2020; Vasenev et al., 2021]. Тем не менее, на текущем уровне развития современных моделей прогноза погоды и климата явный учет теплообмена между атмосферой и отдельными элементами городской среды (зданиями, деревьями и пр.) не представляется возможным. Для решения этой проблемы применяют параметризации физических процессов в слое городской застройки (далее — городские параметризации). В рамках таких параметризаций городская поверхность, попадающая в ячейку расчетной сетки модели, считается однородной по пространству и рассматривается в виде упрощенной геометрии, описываемой набором статистических параметров. К настоящему моменту разработано большое

количество городских параметризаций разного уровня сложности, многие из которых имплементированы в модели атмосферы. В то время как в некоторых моделях доступно на выбор несколько таких параметризаций, в других специфика городской поверхности не принимается во внимание, и остается актуальной задача внедрения городских параметризаций в эти модели.

В литературе существуют хорошо структурированные обзоры, посвященные городским параметризациям, в которых приводятся их классификация и описываемые в них физические процессы [Masson, 2006; Grimmond et al., 2010a]. Однако будучи написанными более 10 лет назад, они уже не являются достаточно актуальными. Наиболее свежий обзор [Garuma, 2018] содержит обновленную информацию о городских параметризациях; он посвящен основным принципам работы с ними — от источников данных о городской поверхности до возможных областей применения городского моделирования; вместе с тем, физические аспекты параметризаций затронуты в меньшей степени.

Цель настоящей работы — актуализировать ранее выполненные обзоры параметризаций городской поверхности, сравнить используемые в них подходы к описанию отдельных групп физических процессов внутри городского подслоя; выявить достоинства и недостатки этих подходов и сформулировать предложения по дальнейшему развитию и улучшению таких параметризаций.

Статья построена следующим образом. В разделе 1 приводится общий обзор принципов построения параметризаций городской застройки и их видов; приводятся примеры наиболее распространенных в мировой практике параметризаций разного уровня сложности. Раздел 2 посвящен сравнению используемых в этих параметризациях подходов к описанию различных групп физических процессов: теплообмена в деятельном слое и теплового баланса (2.1), радиационного теплообмена поверхности с атмосферой (2.2), баланса влаги на поверхности (2.3), турбулентного тепло- и влагообмена в городском подслое (2.4), антропогенного влияния на потоки тепла и влаги (2.5) и радиационного и турбулентного взаимодействия с городской растительностью (2.6). В разделе 3 сформулированы основные выводы обзора с обобщающей таблицей по сопоставлению основных типов городских параметризаций по полноте и сложности описываемых ими физических процессов, а также даны рекомендации по их возможному улучшению.

1. ГОРОДСКИЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ

В конце 70-х годов XX века ученым Тимоти Оке была предложена концепция “городского ка-

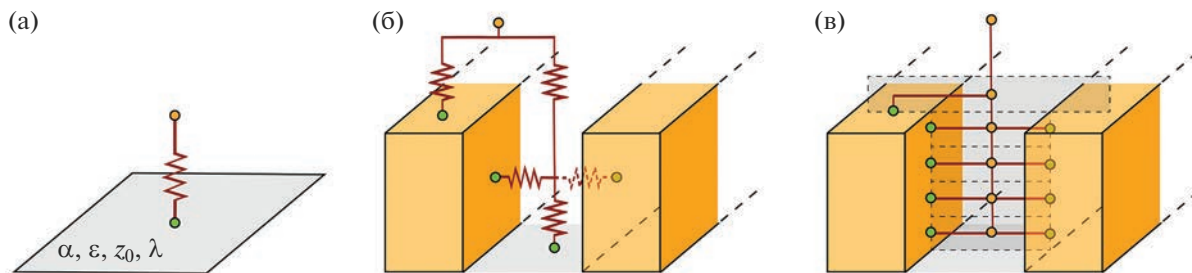


Рис. 1. Схематическое представление основных типов городских параметризаций: а) slab-модели, б) одноуровневые модели городского подслоя, в) многоуровневые модели городского подслоя. Обозначения α , ϵ , z_0 , λ соответствуют альбедо, излучательной способности, параметру динамической шероховатости и теплопроводности поверхностного слоя.

ньона” [Nunez and Oke, 1977], в рамках которой сложная городская поверхность представляется в виде довольно простой геометрии – расположенных напротив друг друга зданий и дороги между ними. Пространство между зданиями называется каньоном. Для его геометрического описания используют два основных параметра: высота каньона и ширина каньона (расстояние между двумя зданиями). Стоит отметить, что эта концепция оказалась настолько удачной, что до сих пор лежит в основе практически всех городских параметризаций.

Существуют два принципиально различных способа описания влияния городской застройки на взаимодействие атмосферы с поверхностью. Наиболее простые параметризации городской поверхности называются slab-модели, или балк-параметризации, и подразумевают модификацию параметров схемы расчета турбулентных и радиационных потоков на поверхности почвы. Город в этом случае представляется в виде плоской горизонтальной поверхности (рис. 1а), параметры которой модифицированы таким образом, чтобы учесть характерные особенности городской застройки (например, используются более высокие значения теплоемкости, теплопроводности и параметра шероховатости, и, наоборот, меньшие значения альбедо). Данные параметры определяются в соответствии с характеристиками городского каньона, задаваемыми через высоту и ширину каньона. Для всей “городской” ячейки модели рассчитывается одно значение температуры поверхности, характеризующее городскую среду в целом, и, соответственно, по одному значению потоков явного и скрытого тепла с поверхности в атмосферу.

Параметризации, в которых явно воспроизводится геометрия города в виде городского каньона, называются моделями городского подслоя (Urban Canopy Models). Здесь город больше не является плоской поверхностью, а имеет объемную, хоть и упрощенную форму, характеризующую эле-

ментами каньона: дорогой, стенами и крышей. Для каждой из этих поверхностей отдельно моделируется радиационный (с описанием эффектов затенения, переотражения и переизлучения) и тепловой баланс, обеспечивая тем самым учет термической неоднородности застройки.

Различают два основных типа моделей городского подслоя, а именно: одноуровневые (Single-Layer Urban Canopy Models – SLUCM, рис. 1б) и многоуровневые (Multi-Layer Urban Canopy Models – MLUCM, рис. 1в) модели. Основное отличие между ними – это количество вертикальных уровней. В одноуровневых моделях для каждого элемента каньона рассчитывается одно значение потока с поверхности (один поток от дороги, один поток от стены и один поток от крыши). Во многоуровневых моделях происходит деление городского каньона от его вершины до дорожного покрытия на несколько уровней, на каждом из которых решается уравнение притока тепла в воздухе. Такой подход позволяет более точно смоделировать вертикальное распределение тепла, влаги и импульса по всему слою городского каньона и воспроизвести такие локальные метеорологические явления как городской остров тепла или слой инверсии над городом [Chen et al., 2011]. Однако многоуровневые модели требуют больших вычислительных ресурсов по сравнению с другими типами городских параметризаций [Gaguma, 2018].

К настоящему времени научным сообществом разработан достаточно широкий набор параметризаций разного уровня сложности, которые имплементированы в различные модели атмосферы (табл. 1). К типу slab-моделей относится, например, параметризация TERRA_URB [Wouters et al., 2015; 2016] в модели атмосферы COSMO, которая хорошо зарекомендовала себя в задачах моделирования городского климата на примере города Москвы [Varentsov et al., 2018; 2019; 2020] и на данный момент успешно используется в системе численного прогноза погоды COSMO–Ru Гидро-

Таблица 1. Рассматриваемые в статье параметризации городской поверхности

Название параметризации и аббревиатура	Тип	Описание параметризации	В каких моделях атмосферы используется	Примеры исследований с использованием параметризации (ссылки)
TERRA_URB	Балк—параметризация	Wouters et al., 2015, 2016	COSMO	Varentsov et al., 2018, 2019, 2020; Garbero et al., 2021
TEB (Town Energy Balance)	Одноуровневая модель городского подслоя	Masson, 2000; Hamdi and Masson, 2008; Lemonsu et al., 2012; Bueno et al., 2012; Redon et al., 2017, 2020; Schoetter et al., 2020	Meso—NH	Hamdi et al., 2012; Trusilova et al., 2013; Schoetter et al., 2020
SLUCM (Single—Layer Urban Canopy Model)	Одноуровневая модель городского подслоя	Kusaka et al., 2001; Kusaka and Kimura, 2004; Yang et al., 2015	WRF	Kusaka et al., 2012; Miao and Chen, 2014; Wang et al., 2021
MORUSES (Met Office—Reading Urban Surface Exchange Scheme)	Одноуровневая модель городского подслоя	Porson et al., 2010	Unified Model	Bohnenstengel et al., 2011, 2014; Hertwig et al., 2020; Simón—Moral et al., 2020
BEP (Building Effect Parameterization)	Многоуровневая модель городского подслоя	Martilli et al., 2002, Salamanca et al., 2010; Krayenhoff et al., 2014, 2015; Mussetti et al., 2020b	WRF, HIRLAM COSMO*	Salamanca et al., 2012; de la Paz D. et al., 2016; Mussetti et al., 2020b; Ribeiro et al., 2021
DCEP (Double—Canyon Effect Parameterization)	Многоуровневая модель городского подслоя	Schubert et al., 2012; Jin et al., 2021	COSMO*	Shubert et al., 2012, 2014; Mussetti et al., 2020a

* Параметризация используется в исследовательском режиме в отдельных ветках развития модели, не доступна в основной оперативной версии.

метцентра России для прогнозов по Московскому региону [Ривин и др., 2019]. Классической одноуровневой моделью городского подслоя считается параметризация TEB (Town Energy Balance) [Masson, 2000] — первая параметризация такого типа. Параметризация TEB встроена в модель деятельного слоя суши SURFEX [Masson, 2013] и используется в моделях прогноза погоды метеослужбы Франции, например, Meso—NH [Lac et al., 2018]. Концептуально похожая на TEB параметризация SLUCM (Single—Layer Urban Canopy Model) разработана в Японии [Kusaka et al., 2001] и позднее встроена в исследовательскую версию модели атмосферы WRF [Chen et al., 2011]. В британской метеорологической службе совместно с атмосферной моделью Unified Model используется одноуровневая параметризация MORUSES (Met Office—Reading Urban Surface Exchange Scheme) [Porson et al., 2010; Bohnenstengel and Hendry, 2016]. Классической многоуровневой моделью городского подслоя является параметризация BEP (Building Effect Parameterization) [Martilli et al.,

2002], которая так же, как и параметризация SLUCM, встроена в модель атмосферы WRF [Chen et al., 2011]. Интересной с точки зрения описания городской поверхности является многоуровневая параметризация двойного каньона DCEP (Double—Canyon Effect Parameterization) [Schubert et al., 2012], основанная на параметризации BEP. Исследования с использованием этой параметризации проводились на основе климатической версии модели атмосферы COSMO [Schubert and Grossman—Clarke, 2014; Mussetti et al., 2020a].

Стоит отметить, что за последние два десятилетия городские параметризации были существенно улучшены. Они были дополнены как с точки зрения детальности описания физических процессов, так и за счет включения новых блоков таких, например, как городская растительность или модель теплового баланса здания (рис. 2). В следующем разделе статьи на примере перечисленных параметризаций (табл. 1) рассмотрены ключевые подходы, используемые для описания

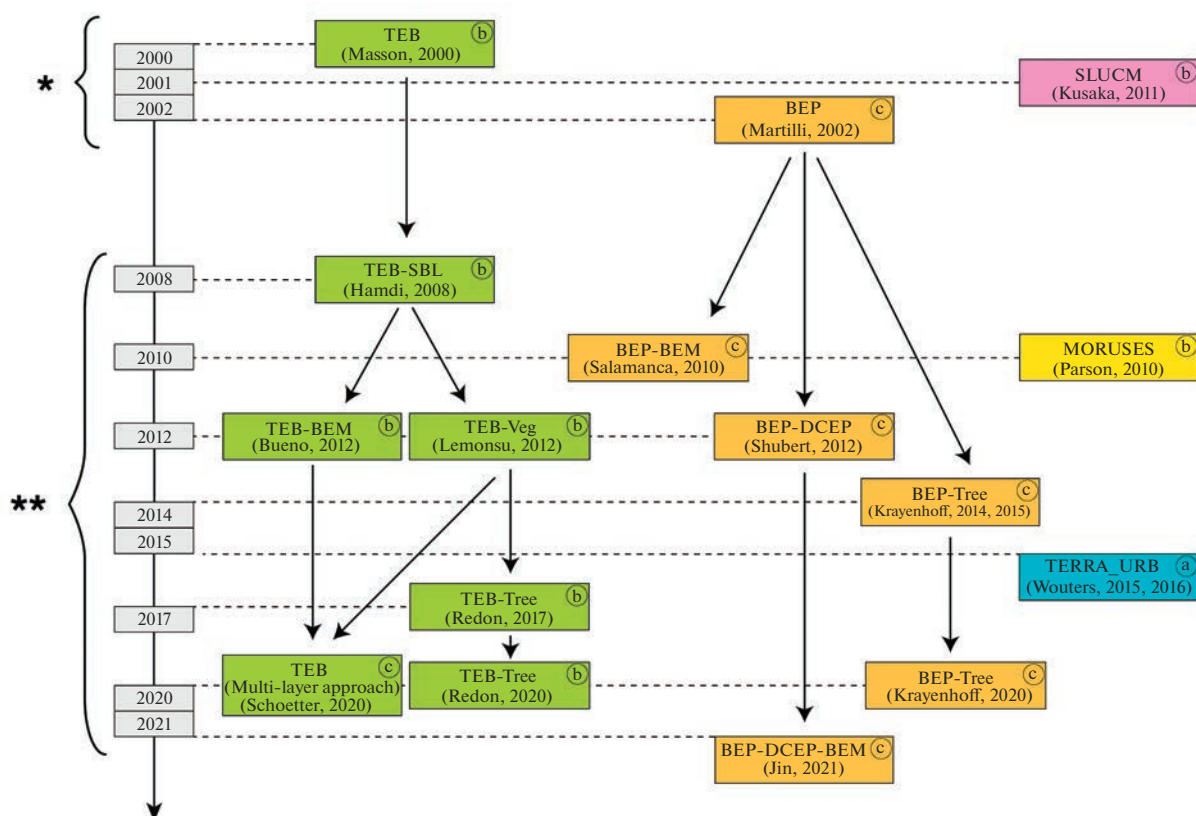


Рис. 2. Этапы развития городских параметризаций. * – I этап: разработка первых моделей городского подслоя: одноуровневых (TEB и SLUCM) и многоуровневых (BEP) городских параметризаций. ** – II этап: создание новых городских параметризаций (MORUSES и TERRA_URB); улучшение воспроизведения турбулентных потоков (TEB–SBL, TEB (Multi–layer approach)); включение в модели городского подслоя модели теплового баланса здания (Building Energy Model – BEM); интеграция в модели городского подслоя блока городской растительности (TEB–Veg, BEP–Tree, TEB–Tree); улучшение параметризации радиационных процессов (BEP–DCEP). Буквами в правом верхнем углу обозначен тип городской параметризации: а – балк–параметризация, б – одноуровневая модель городского подслоя, с – многоуровневая модель городского подслоя.

основных физических процессов в городском подслое.

2. ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГО- И МАССООБМЕНА

Для того, чтобы описать энерго- и массообмен города с атмосферой, в модели требуется параметризовать ряд физических процессов. Основные из них: тепло- и влагообмен в деятельном слое, радиационные взаимодействия между городской поверхностью и атмосферой, турбулентный обмен в слое городской застройки, процессы, связанные с антропогенными источниками тепла и влаги. Полнота и сложность описания этих процессов зависит от типа городской параметризации.

2.1. Тепловой баланс поверхности

Городская застройка характеризуется сильной неоднородностью распределения температуры. В

моделях городского подслоя эта неоднородность воспроизводится путем рассмотрения уравнения теплового баланса для каждого из элементов каньона: поверхности крыши, дороги и стен:

$$0 = S_i + L_i - H_i - LE_i - G_i, \quad (1)$$

где i – идентификатор типа поверхности: дорога (“r”), стена (“w”), крыша (“R”); S_i – поверхностный баланс коротковолновой радиации; L_i – поверхностный баланс длинноволновой радиации; H_i – поток явного тепла от поверхности; LE_i – поток скрытого тепла от поверхности; G_i – поток тепла внутрь городской поверхности.

Расчет компонентов радиационного баланса и турбулентных потоков тепла и влаги подробно описаны в разделах (2.2) и (2.4). Диффузионные потоки тепла получаются путем численного решения уравнения теплопроводности на сетке из нескольких уровней для каждого типа поверхности. Первый уровень взаимодействует напрямую с воздухом (поверхностный слой), а его темпера-

тура используется для оценки радиационных и турбулентных потоков с поверхности. Для адекватного описания каждого типа поверхности рекомендуется использовать минимум 3 уровня [Masson, 2000].

В slab-моделях спецификация теплового баланса городской поверхности происходит за счет модификации значений теплоемкости и теплопроводности городского деятельного слоя. В параметризации TERRA_URB это делается в концепции предположения, что в реальности площадь поверхности городской застройки, непосредственно контактирующая с воздухом, намного больше, чем у плоской поверхности, а значит и поток тепла при прочих равных условиях от городской поверхности в атмосферу больше. Чтобы учесть этот эффект, значения теплоемкости и теплопроводности городской поверхности умножаются на индекс площади поверхности, который подразумевает суммарную площадь дороги, двух стен и крыши, отнесенную к площади горизонтального участка (ячейки):

$$c_{bulk} = c \left[\left(1 + 2 \frac{H}{W} \right) (1 - \delta_R) + \delta_R \right], \quad (2)$$

$$\lambda_{bulk} = \lambda \left[\left(1 + 2 \frac{H}{W} \right) (1 - \delta_R) + \delta_R \right], \quad (3)$$

где c_{bulk} , λ_{bulk} — объемная теплоемкость и теплопроводность городской поверхности; c , λ — задаваемая теплоемкость и теплопроводность материалов, формирующих городскую поверхность; H — высота каньона; W — ширина каньона; δ_R — доля городской ячейки, занимаемая крышей.

Таким образом поток тепла рассчитывается с увеличенной в соответствии с параметрами городского каньона площади городской поверхности.

2.2. Радиационный баланс поверхности

В моделях городского подслоя описываются радиационные процессы, происходящие непосредственно внутри городского каньона. Для правильного описания радиационных потоков необходимо учитывать два основных эффекта: эффекты затенения и эффекты переотражения/переизлучения в городском каньоне. При различных высотах Солнца стены каньона могут отбрасывать тень на дорогу или на противоположную стену каньона. Поэтому при расчете потока прямой солнечной радиации учитывается эффект затенения через параметры каньона (высоту и ширину) и зенитный угол Солнца. В оригинальной версии параметризации TEB [Masson, 2000] и параметризации MORUSES [Porson et al., 2010] принимается, что городская застройка хаотично расположена без выраженной преобладающей ориентации каньона в пространстве. Поэтому формулы для потока прямой солнечной радиации на элементы каньона полу-

чаются интегрированием по всем возможным направлениям каньона выражений, полученных для одного направления. В последующих версиях TEB добавлена возможность задания азимута каньона, благодаря которой воспроизведение радиационных потоков значительно улучшилось [Lemonsu et al., 2012]. Иной подход используется в параметризациях SLUCM [Kusaka et al., 2001] и BEP [Martilli et al., 2002], где существует возможность задания не одной, а нескольких преобладающих ориентаций каньона. Значения радиационных потоков рассчитываются для каждого заданного направления каньона, а затем осредняются по ячейке с учетом площадей, занимаемых каньонами разных направлений. Отражение коротковолновой радиации в моделях городского подслоя считается изотропным и определяется путем прямого решения системы уравнений для различных элементов каньона методом обратной матрицы [Martilli et al., 2002; Harman et al., 2004a; Porson et al., 2010], либо в приближении однократного отражения [Kusaka et al., 2001], или как в параметризации TEB — приближения неограниченного числа энергетически эффективных переотражений между элементами каньона [Masson, 2000]. При параметризации радиационного баланса также важно то, как задается высота каньона. Наиболее распространенным является представление городской поверхности одним каньоном с высотой, которую можно рассчитать, как среднюю по ячейке модели [Masson, 2000; Kusaka et al., 2001; Porson et al., 2010]. Более близкое к реальности описание зданий с точки зрения их высоты представлено в параметризации BEP [Martilli et al., 2002], где высота каньона не является постоянной величиной, а задается функцией распределения. Радиационные потоки рассчитываются на каждом уровне каньона с учетом вероятности превышения зданиями высоты этого уровня (рис. 3а).

Поверхность крыши каньона, как правило, представляется в виде плоской поверхности. Поэтому в параметризациях, где высота каньона задается средней величиной, поверхность крыш никак не взаимодействует радиационными потоками с другими элементами каньона: стены не могут отбрасывать на нее тень, а отраженная от поверхности крыши радиация полностью уходит обратно в атмосферу (рис. 3б — слева) [Masson, 2000; Kusaka et al., 2001]. Несмотря на то, что в параметризации BEP высота зданий задается функцией распределения, обмен радиационными потоками происходит только внутри каньона. Чтобы включить поверхность крыш в эффекты затенения и переотражения на основе параметризации BEP была разработана модель двойного каньона — DCEP [Schubert et al., 2012]. Такой подход предполагает два одинаковых по высоте здания, стоящих по краям двойного каньона, и здание посередине, которое либо выше, либо ниже со-

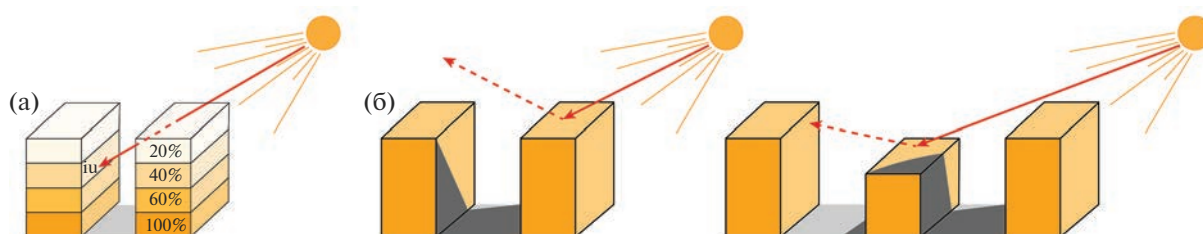


Рис. 3. Схематическое представление а) радиационного взаимодействия в параметризации ВЕР. i_u — вертикальный уровень; проценты характеризуют долю зданий заданной высоты; б) учета эффектов затенения и отражения в стандартных моделях городского подслоя (слева) и в модели двойного каньона DCEP [Schubert et al., 2012] (справа).

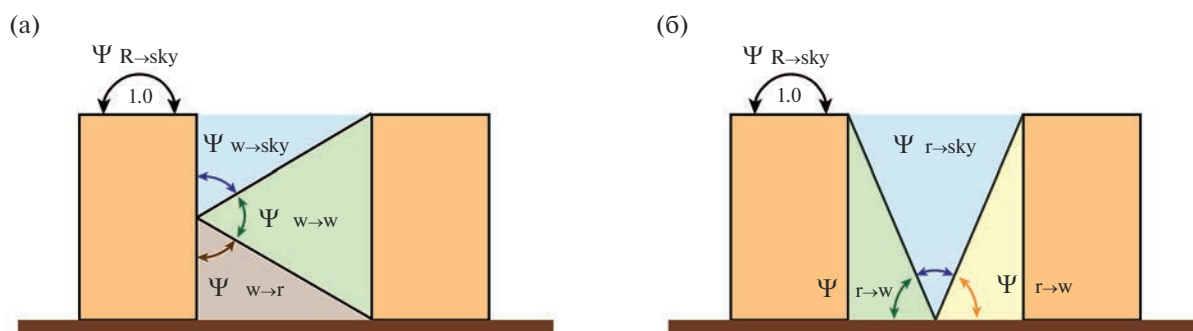


Рис. 4. Схематическое представление факторов обзора $\Psi_{i \rightarrow j}$ для срединной точки а) на поверхности стены и б) на поверхности дороги, где “R” — крыша, “r” — дорога, “w” — стена, “sky” — небо.

седних двух (рис. 3б — справа). За счет введения здания в центре каньона обеспечивается учет возможного затенения поверхности крыши более высоким зданием и переотражения радиации от крыши более низкого здания на противоположную стену каньона.

Так как поверхность города трехмерна, то при расчете радиационных потоков в городском каньоне используется множитель, который называется фактор обзора неба (Sky View Factor). Он представляет собой долю неба, видимую с дороги или с одной стены, по сравнению с долей неба, которую наблюдатель на плоской горизонтальной поверхности мог бы видеть без наличия препятствий. Так, фактор обзора неба для крыши равен 1, так как ничего не препятствует ее затенению (но только не в случае параметризации DCEP). Если здания очень низкие, то фактор обзора неба с дороги ($\Psi_{r \rightarrow sky}$) стремится к 1, а фактор обзора неба со стены ($\Psi_{w \rightarrow sky}$) — к 0.5 (каждая стена каньона “видит” половину неба). Напротив, если здания очень высокие, оба фактора обзора неба стремятся к нулю. Это приводит к увеличению радиационного обмена между внутренними элементами каньона: многократные переотражения коротковолновой радиации способствуют уменьшению эффективного альбедо каньона, а

приходящая длинноволновая радиация с поверхности внутренних элементов каньона доминирует над длинноволновой радиацией, приходящей из атмосферы [Oke et al., 2017]. Помимо фактора обзора неба определяются факторы обзора поверхности. Они характеризуют, какую долю элемента каньона (стены или дороги) “видит” та или иная поверхность (дорога или противоположная стена), и рассчитываются из геометрических соотношений.

Приходящая к поверхности коротковолновая радиация в общем случае (при возможности задания распределения зданий по высоте) состоит из прямой, рассеянной и отраженной радиации. Прямая солнечная радиация включает в себя приходящую к поверхности дороги или участка стены прямую солнечную радиацию с учетом вклада каждого вертикального уровня в затенение поверхности и прямую солнечную радиацию, приходящую от тех участков небосвода, где с вероятностью $(1 - \Gamma(z_{ju+1}))$ высота здания ниже уровня ju . Рассеянная солнечная радиация рассчитывается аналогичным образом с тем отличием, что для нее не нужен учет затенения. Ниже приведены уравнения для случая, когда поверхность крыши не участвует в радиационных взаимодействиях с другими элементами каньона, и значит, что отраженная радиация может прихо-

диль только с поверхности дороги или участка стены:

$$\begin{aligned}
 S_r &= S_r^{\downarrow*} + \underbrace{\sum_{ju=1}^{nu} \Psi_{r \rightarrow ju} (S_{w,ju} + S_{E,ju}) (1 - \Gamma(z_{ju+1}))}_{\text{прямая}} + \\
 &+ \underbrace{\Psi_{r \rightarrow sky} S^{\downarrow} + 2 \sum_{ju=1}^{nu} \Psi_{r \rightarrow ju} S^{\downarrow} (1 - \Gamma(z_{ju+1}))}_{\text{рассеянная}} + \quad (4) \\
 &+ \underbrace{\sum_{ju=1}^{nu} \alpha_w \Psi_{r \rightarrow ju} (S_{w,ju} + S_{E,ju}) \Gamma(z_{ju+1})}_{\text{отраженная}}, \\
 S_{iu}^W &= S_{iu}^{\downarrow*} + \underbrace{\sum_{ju=1}^{nu} \Psi_{iu \rightarrow ju} S_{ju}^W (1 - \Gamma(z_{ju+1}))}_{\text{прямая}} + \\
 &+ \underbrace{\Psi_{iu \rightarrow sky} S^{\downarrow} + \sum_{ju=1}^{nu} \Psi_{iu \rightarrow ju} S^{\downarrow} (1 - \Gamma(z_{ju+1}))}_{\text{рассеянная}} + \quad (5) \\
 &+ \underbrace{\alpha_r \Psi_{iu \rightarrow r} S_r + \sum_{ju=1}^{nu} \alpha_w \Psi_{iu \rightarrow ju} S_{ju}^E \Gamma(z_{ju+1})}_{\text{отраженная}}, \\
 S_R &= S_R^{\downarrow} + S^{\downarrow}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

где S_i^j — приходящая к поверхности коротковолновая радиация; i — идентификатор типа поверхности: дорога (“ r ”), участок стены, определяемый вертикальным уровнем (“ iu ”), крыша (“ R ”);

j — идентификатор характеристики стены относительно положения Солнца: западная (“ W ”), восточная (“ E ”), $S_i^{\downarrow*}$ — прямая солнечная радиация, приходящая к поверхности напрямую из атмосферы, с учетом эффекта затенения; $S_R^{\downarrow}$ — солнечная радиация, приходящая к поверхности крыши; $S^{\downarrow}$ — приходящая рассеянная солнечная радиация; $\Psi_{i \rightarrow sky}$ — фактор обзора неба для поверхности i ; nu — количество вертикальных уровней; $\Psi_{i \rightarrow j}$ — фактор обзора поверхности j поверхностью i ; j — идентификатор типа поверхности: дорога (“ r ”), участок стены (“ iu ”); $\Gamma(z_{ju+1})$ — вероятность, что здание высоты уровня $ju+1$ и выше существует [Martilli et al., 2002]; α_i — альбедо поверхности. Для каньона со зданиями одинаковой высоты $nu = 1$, $\Gamma(z_{ju+1}) = 1$.

В одноуровневых моделях городского подسоя нет деления на вертикальные уровни, поэтому в уравнениях для приходящей солнечной радиации к поверхности дороги и стены отсутствуют второе и четвертое слагаемые и исключается суммирование по вкладу отдельно каждого участка стены в отражение солнечной радиации.

Приходящая к поверхности дороги или участку стены длинноволновая радиация складывается из приходящего напрямую из атмосферы длинноволнового излучения, собственного излучения поверхности и доли длинноволновой радиации, излученной или отраженной от других элементов каньона (дороги/стен):

$$\begin{aligned}
 L_r &= \underbrace{\Psi_{r \rightarrow sky} L^{\downarrow} + \sum_{ju=1}^{nu} \Psi_{r \rightarrow ju} L^{\downarrow} (1 - \Gamma(z_{ju+1}))}_{\text{атмосфера}} + \quad (7) \\
 &+ \underbrace{\sum_{ju=1}^{nu} \epsilon_w \Psi_{ju \rightarrow r} \sigma (T_{W_{ju}}^4 + T_{E_{ju}}^4) \Gamma(z_{ju+1}) + \sum_{ju=1}^{nu} (1 - \epsilon_w) \Psi_{ju \rightarrow r} (L_{ju}^W + L_{ju}^E) \Gamma(z_{ju+1})}_{\text{стена}}, \\
 L_{iu}^W &= \underbrace{\Psi_{iu \rightarrow sky} L^{\downarrow} + \sum_{ju=1}^{nu} \Psi_{iu \rightarrow ju} L^{\downarrow} (1 - \Gamma(z_{ju+1}))}_{\text{атмосфера}} + \underbrace{\epsilon_r \Psi_{r \rightarrow iu} \sigma T_r^4 + (1 - \epsilon_r) \Psi_{r \rightarrow iu} L_r}_{\text{дорога}} + \quad (8) \\
 &+ \underbrace{\sum_{ju=1}^{nu} \epsilon_w \Psi_{iu \rightarrow ju} \sigma T_{E_{ju}}^4 \Gamma(z_{ju+1}) + \sum_{ju=1}^{nu} (1 - \epsilon_w) \Psi_{iu \rightarrow ju} L_{ju}^E \Gamma(z_{ju+1})}_{\text{стена}},
 \end{aligned}$$

$$L_R = \epsilon_R L^{\downarrow} - \epsilon_R \sigma T_R^4, \quad (9)$$

где L_i — приходящая к поверхности длинноволновая радиация; $L^{\downarrow}$ — приходящая длинноволновая радиация из атмосферы; ϵ_i — излучательная способность поверхности; σ — постоянная Сте-

фана–Больцмана; T_i — температура поверхности. Для каньона со зданиями одинаковой высоты $nu = 1$, $\Gamma(z_{ju+1}) = 1$.

В параметризациях ТЕВ и SLUCM данные уравнения записываются в приближении однократного переотражения поверхностью каньона

падающего длинноволнового излучения [Masson, 2000; Kusaka et al., 2001].

В параметризациях по типу slab-моделей городской каньон явным образом не воспроизводится. Поэтому влияние городской поверхности на радиационные потоки осуществляется за счет двух основных параметров подстилающей поверхности: “объемного альbedo” и “объемной излучательной способности”. На основе численных экспериментов [Fortuniak, 2007] было получено, что увеличение отношения аспекта каньона $\left(\frac{H}{W}\right)$ приводит к значительному уменьшению эффективного альbedo системы городского каньона. Данное приближение в параметризации TERRA_URB вводится через функцию Ψ_{bulk} , где вклад геометрии крыши и самого каньона в уменьшение эффективного альbedo пропорционален занимаемой ими площади. Предполагается, что геометрия плоской крыши никак не влияет на значение альbedo, а уменьшение альbedo городским каньоном вводится через экспоненциальную зависимость:

$$\Psi_{bulk} = \delta_R + (1 - \delta_R) \exp\left(-0.6 \frac{H}{W}\right). \quad (10)$$

Значения альbedo и излучательной способности поверхности корректируется в соответствии с типом городской застройки путем умножения на эту функцию. Скорректированные значения затем используются при расчете коротковолновой и длинноволновой радиации в модели атмосферы. По оценкам [Fortuniak, 2007] данное приближение обеспечивает высокую точность при низких высотах Солнца.

2.3. Баланс влаги на поверхности

При моделировании баланса влаги город представляется в виде непроницаемой поверхности. Выпавшие осадки учитываются как резервуар воды на горизонтальной поверхности. Причем емкость этих резервуаров предполагается конечной, в связи с чем задается параметр W_{max} , характеризующий максимально возможное количество воды на поверхности. Если выпавшее количество осадков превышает объем резервуара, то излишек воды в виде стока уходит в дренажную систему канализации. Также определяется доля поверхности, занимаемая выпавшими осадками, которая связана с наполненностью резервуара степенью $2/3$ [Masson, 2000; Wouters et al., 2015]:

$$\delta_l = \left(\frac{W}{W_{max}}\right)^{2/3}, \quad (11)$$

где δ_l — доля поверхности, занимаемая жидкими осадками; W — влагосодержание резервуара; W_{max} — объем резервуара.

В параметризации ТЕВ максимально возможное количество воды на поверхности устанавливается равным 1 кг/м^2 , что находится в диапазоне оптимальных значений, полученных в [Grimmond and Oke, 1991] для городских поверхностей. В параметризации TERRA_URB для оценки аналогичного параметра была адаптирована методика [Sarkar and De Ridder, 2012], согласно которой максимальная емкость рассчитывается на основе функций плотности распределения смоделированных и наблюдаемых значений потоков скрытого тепла. Баланс влаги на поверхности в общем случае определяется как сумма выпавших осадков минус испарение [Masson, 2000]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = R - \frac{LE}{L_v}, \quad (W < W_{max}), \quad (12)$$

где R — интенсивность дождя; L_v — скрытая теплота испарения.

2.4. Турбулентный обмен в слое городской застройки

В моделях городского подслоя турбулентные потоки параметризуются либо с использованием 1) подхода на основе теории приземного (логарифмического, $\log$ —) слоя (the roughness approach), либо 2) подхода объемного сопротивления (the drag—force approach) [Garuma, 2018].

Подход $\log$ —слоя преимущественно используется в одноуровневых моделях городского подслоя (например, [Masson, 2000; Kusaka et al., 2001; Porson et al., 2010]), где турбулентные потоки тепла и влаги с поверхности городского каньона рассчитываются в соответствии с теорией подобия Мони́на—Обухова (ТПМО). В исследовании [Feigenwinter, 1999] по результатам измерительной кампании в городе Базель (Швейцария) было получено, что температурные характеристики, в частности турбулентный поток тепла, плохо воспроизводятся в рамках приближений этой теории, когда рассматривается теплообмен между единой термически однородной поверхностью и атмосферой. Это связано с наличием различных источников тепла в районах городской застройки, а также различием теплофизических и радиационных свойств поверхности. В городских параметризациях эта проблема решается в приближении, что существуют два основных турбулентных потока тепла от городской поверхности в атмосферу (рис. 5а): поток тепла от крыш и поток тепла от каньона, равный сумме потоков от стен и от дороги. Параметризация турбулентного смешивания потоков происходит за счет осреднения вклада каждого источника относительно занимаемой поверхности. Турбулентные потоки тепла и влаги записываются в соответствии с концепцией сопротивлений:

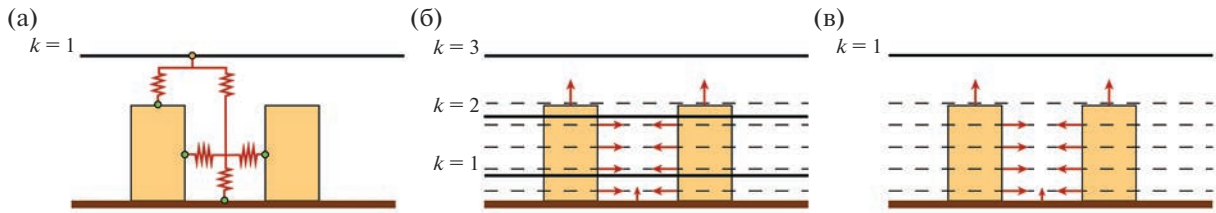


Рис. 5. Схематическое представление параметризации турбулентных потоков в моделях городского подслоя: а) подход лог-слоя с сопротивлениями в одноуровневых моделях городского подслоя, б) подход на основе объемного сопротивления в многоуровневых моделях городского подслоя, в) подход на основе объемного сопротивления в одноуровневых моделях городского подслоя [Hamdi and Masson, 2008]. Жирными сплошными линиями обозначены уровни модели атмосферы. Пунктирными линиями обозначены уровни городской модели.

$$H_i = \rho c_{pd} (T_a - T_i) / RES_i, \quad (13)$$

$$LE_i = \rho L_v (q_a - q_i) / RES_i, \quad (14)$$

где H_i , LE_i — потоки явного и скрытого тепла от поверхности, i — идентификатор типа поверхности: дорога (“r”), стена (“w”), крыша (“R”), пространство каньона (“can”); ρ — плотность воздуха; c_{pd} — удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении; T_a, q_a — температура и влажность воздуха (внутреннего пространства каньона при расчете потоков с поверхности дороги и стены или приземного слоя атмосферы над застройкой при расчете потоков с поверхности крыши или пространства каньона); T_i, q_i — температура и влажность поверхности; RES_i — аэродинамическое сопротивление между поверхностью и атмосферой, которое может задаваться в соответствии с ТПМО, либо по эмпирическим формулам (см. ниже).

Коэффициенты теплообмена между поверхностью стены и дороги, как правило, определяются через эмпирическую зависимость от скорости ветра внутри каньона: чем выше скорость ветра, тем лучше отводится тепло от поверхности, при прочих равных условиях. В параметризации SLUCM [Kusaka et al., 2001] используется формула [Juerges, 1924; Smith, 2010], полученная на основе экспериментов с пластинками различной шероховатости в аэродинамической трубе:

$$RES_r = RES_w = \begin{cases} (7.51 U_{can}^{0.78})^{-1} & (U_{can} > 5 \text{ м/с}) \\ (6.15 + 4.18 U_{can})^{-1} & (U_{can} \leq 5 \text{ м/с}) \end{cases}, \quad (15)$$

где U_{can} — горизонтальная скорость ветра в каньоне.

В параметризации ТЕВ коэффициенты аэродинамического сопротивления между стеной/дорогой и воздухом рассчитываются в соответствии с результатами [Rowley et al., 1930; 1932], полученными на основе серии лабораторных экспериментов по аналогии с [Juerges, 1924], но с учетом зависимости от покрытия пластинки основными

типами городской отделки (кирпич, бетон, дерево, стекло и др.):

$$RES_r = RES_w = (11.8 + 4.2 U_{can})^{-1}. \quad (16)$$

Коэффициенты турбулентного теплообмена между поверхностью крыши и атмосферой, а также между пространством каньона и атмосферой рассчитываются с использованием ТПМО и в общем случае зависят от параметров аэродинамической и термической шероховатости конкретной поверхности и функций устойчивости. В версии ТЕВ [Masson et al., 2002] определение коэффициента теплообмена для поверхности дороги было переформулировано также в соответствии с подходом на основе ТПМО, так как при проведении численных экспериментов для Ванкувера (город характеризуется малоэтажной застройкой (1–3 этажа), где велика роль дорог в общем тепловом балансе), эмпирическая зависимость от скорости ветра давала завышенные оценки температуры поверхности.

Скорость ветра рассчитывается в предположении, что между верхней границей каньона и атмосферой ветер изменяется по логарифмическому закону, а внутри каньона — по экспоненциальному [Masson, 2000; Kusaka et al., 2001; Porson et al., 2010; Harman and Finnigan, 2007] (рис. 6а).

В общем случае формула для расчета скорости ветра в каньоне может быть записана следующим образом:

$$U_{can} = U_a \frac{\ln\left(\frac{Z_{top} - d}{z_{0u}}\right)}{\ln\left(\frac{Z_a - d}{z_{0u}}\right)} \exp(N), \quad (17)$$

где U_a — скорость ветра на нижнем уровне модели атмосферы над застройкой; Z_{top} — высота, выше которой принимается логарифмический профиль ветра; Z_a — высота нижнего уровня модели атмосферы; d — высота вытеснения для городской застройки; z_{0u} — параметр аэродинамиче-

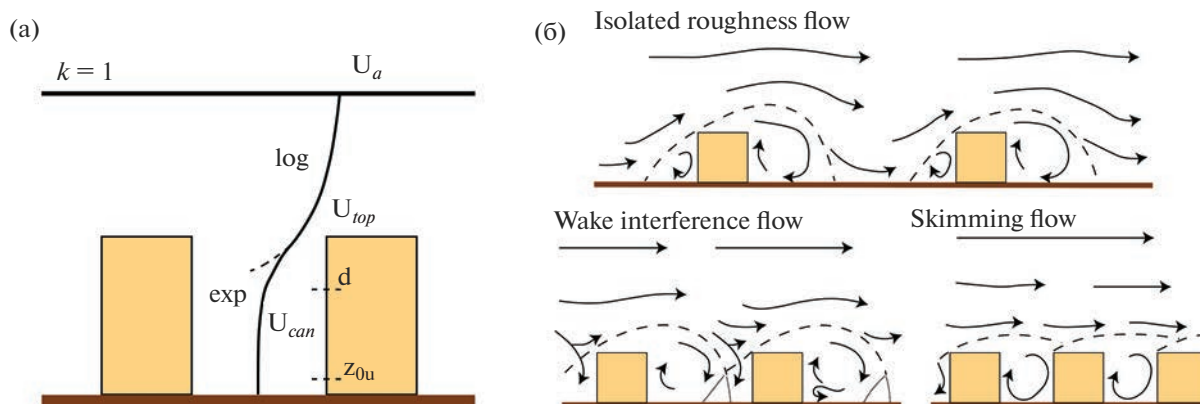


Рис. 6. Схематическое представление а) вертикального профиля ветра в одноуровневых параметризациях городского подслоя. Сплошной черной линией обозначен ближайший к застройке уровень модели атмосферы ($k = 1$). U_a – скорость ветра на уровне модели атмосферы, U_{top} – скорость ветра на вершине каньона, U_{can} – скорость ветра в каньоне, d – высота вытеснения для городской застройки, z_{0u} – уровень аэродинамической шероховатости городской поверхности; б) режима ветра в зависимости от типа застройки: Isolated roughness flow (поток с изолированными вихрями, при $\frac{H}{W} < 0.3 - 0.4$), Wake Interference flow (поток с интерференцией вихрей, при $0.3 - 0.4 \leq \frac{H}{W} \leq 0.65 - 0.7$), Skimming flow (скользящий поток, при $\frac{H}{W} > 0.65 - 0.7$), по [Oke, 1987].

ской шероховатости городской поверхности; N – показатель экспоненты.

Значение показателя экспоненты в параметризации ТЕВ задается через зависимость от отношения аспекта каньона в соответствии с данными измерений, полученным [Aguia, 1988] в кукурузном поле и [Rotach, 1995] в городской застройке. Согласно результатам измерений, для скорости ветра на половине высоты каньона N выражается как:

$$N = -\frac{1}{4} \frac{H}{W}. \quad (18)$$

В параметризации SLUCM [Kusaka et al., 2001] этот показатель также зависит от отношения аспекта каньона и определяется в соответствии с исследованием [Swaid, 1993], где зависимость получена на основании натурных экспериментов с моделью каньона в естественных условиях при различных его конфигурациях:

$$N = -0.386 \frac{H}{W}. \quad (19)$$

В версии параметризации SLUCM [Kusaka and Kimura, 2004] к обоснованию выбора показателя экспоненты подходят с более содержательной физической точки зрения с использованием при его расчете пути смещения и коэффициента лобового сопротивления.

В параметризации ТЕВ при расчете скорости ветра также введена зависимость от плотности застройки (в виде дополнительного множителя)

[Lemonsu et al., 2004] в соответствии с тремя каноническими режимами потока, выделенными [Oke, 1987] – рис. 6б. В параметризации MORUS-ES [Porson et al., 2010; Harman et al., 2004b] для каждого режима выделяют еще две области: область рециркулирования потока (часть каньона за зданием, где образуются вихри) и область вентиляции (область далее по потоку, где происходит опускание течения в каньон) (подробнее см. [Harman et al., 2004b]). Лучше всего эти две области видны при режиме Skimming flow – рис. 6б, верхняя картинка. Потоки с различных элементов каньона рассчитываются немного по-разному в зависимости от того, в какой области циркуляции находятся данные элементы.

Стоит также добавить, что скорость ветра рассчитывается с учетом интегрирования по всем возможным направлениям каньона (от 0 до 360 градусов) при допущении их равномерного распределения в пределах ячейки сетки.

Параметризация турбулентных потоков на основе объемного сопротивления (drag-approach) была впервые реализована во многоуровневой модели городского подслоя ВЕР [Martilli et al., 2002]. В данном случае уровни модели атмосферы, с которой сопряжена модель города, находятся не над городской застройкой (как это характерно для slab-моделей и одноуровневых моделей городского подслоя), а погружены внутрь каньона (рис. 5б). На каждом уровне атмосферной модели решаются уравнения переноса импульса, температуры, влажности, кинетической энергии

турбулентности (ТКЭ). Для тех уровней, которые непосредственно находятся внутри каньона, добавляется еще одно слагаемое, характеризующее взаимодействие потока с городской поверхностью. Оно рассчитывается на более мелкой сетке городской модели и затем переинтерполируется на сетку модели атмосферы.

Влияние городской застройки рассматривается отдельно как вклад вертикальных поверхностей (стен каньона) и горизонтальных поверхностей (крыши и дороги). Так, сток импульса из атмосферы происходит, с одной стороны, из-за трения воздуха о поверхность горизонтальных элементов каньона, с другой стороны, за счет возникновения разности давления на наветренной и подветренной стороне зданий, вызывающей результирующую силу сопротивления на воздушный поток. Вклад горизонтальных поверхностей в поток импульса ($\vec{F}_{uH}$) в параметризации ВЕР описывается через теорию подобия и зависит от параметра аэродинамической шероховатости, функций устойчивости, квадрата скорости ветра и пропорционален доле площади горизонтальных поверхностей, присутствующих в ячейке:

$$\vec{F}_{uH} = -\rho \frac{k^2}{\left[\ln \left(\frac{\Delta z / 2}{z_{0u}} \right) \right]^2} f_m \left(\frac{\Delta z / 2}{z_{0u}}, Ri_B \right) |\vec{U}_h| \vec{U}_H S_H, \quad (20)$$

где $k = 0.4$ — число Кармана; Δz — вертикальный шаг сетки атмосферной модели; z_{0u} — параметр аэродинамической шероховатости; f_m — функции устойчивости для импульса, определяемые согласно [Louis, 1979]; Ri_B — интегральное число Ричардсона; $\vec{U}_h$ — горизонтальная компонента скорости ветра; S_H — доля площади горизонтальной поверхности в ячейке.

Обмен импульсом на вертикальных поверхностях (стенах) ($\vec{F}_{uv}$) параметризуется с помощью коэффициента лобового сопротивления и квадрата перпендикулярной каньону составляющей скорости ветра с учетом доли вертикальной поверхности в ячейке [Raupach et al., 1991]:

$$\vec{F}_{uv} = -\rho C_{drag} |\vec{U}_{ort}| \vec{U}_{ort} S_V, \quad (21)$$

где C_{drag} — безразмерный коэффициент лобового сопротивления; $\vec{U}_{ort}$ — составляющая скорости ветра, перпендикулярная направлению каньона; S_V — доля площади вертикальной поверхности в ячейке.

В уравнении для температуры вклад горизонтальных городских поверхностей в турбулентный поток тепла ($F_{\theta H}$) записывается на основе ТПМО

с использованием параметров шероховатости и функций устойчивости:

$$F_{\theta H} = -\rho \frac{k^2}{\left[\ln \left(\frac{\Delta z / 2}{z_{0u}} \right) \ln \left(\frac{\Delta z / 2}{z_{0h}} \right) \right]} \times f_h \left(\frac{\Delta z / 2}{z_{0u}}, Ri_B \right) |\vec{U}_h| \Delta \theta S_H, \quad (22)$$

где $\Delta \theta$ — разница между температурой атмосферы и поверхностью крыши/дороги; z_{0h} — параметр термической шероховатости; f_h — функции устойчивости для температуры, определяемые согласно [Louis, 1979]. *В исходной статье [Martilli et al., 2002] данная формула написана в предположении равенства параметров шероховатости.

Определение потока тепла с вертикальных поверхностей ($F_{\theta v}$) во многом похоже на методику, используемую в одноуровневых моделях городского подслоя, где величина потока зависит от разности между температурой воздуха и температурой стены каньона, а также от коэффициента турбулентного обмена, который рассчитывается по эмпирической зависимости от скорости ветра [Arnfield and Grimmond, 1998; Clarke, 1985]:

$$F_{\theta v} = -\frac{\eta}{c_{pd}} [(\theta_{air} - \theta_{wall A}) + (\theta_{air} - \theta_{wall B})] S_V, \quad (23)$$

где θ_{air} , $\theta_{wall A}$, $\theta_{wall B}$ — потенциальная температура воздуха, поверхности стены A и стены B ; η — коэффициент турбулентного обмена.

В прогностическом уравнении для кинетической энергии турбулентности влияние горизонтальной урбанизированной поверхности учитывается как вклад сдвига ветра и плавучести в генерацию ТКЭ (P_H):

$$P_H = \left[\frac{(|\vec{F}_{uH}| / \rho S_H)^2}{k \frac{\Delta z}{2}} + \frac{g}{\theta_0 \rho S_H} F_{\theta H} \right] \rho S_H \Delta z, \quad (24)$$

где g — ускорение свободного падения; θ_0 — референсное значение потенциальной температуры.

Переход средней кинетической энергии в турбулентную за счет взаимодействия потока с вертикальными поверхностями параметризуется через коэффициент лобового сопротивления и перпендикулярную каньону составляющую скорости ветра:

$$F_{ev} = C_{drag} |\vec{U}_{ort}|^3 S_V. \quad (25)$$

Считается, что подход на основе объемного сопротивления способен намного лучше воспроизводить вертикальную структуру метеорологических полей в приземном городском слое (до высоты 50–100 м), нежели подход, основанный на ТПМО [Martilli et al., 2002]. Обратной стороной такого подхода является использование большего числа вычислительных ресурсов, а также дополнительная работа по сопряжению с моделью атмосферы, так как в данном случае необходимо вносить изменения непосредственно в динамический блок модели.

Промежуточным вариантом является применение подхода объемного сопротивления к одноуровневым моделям городского подслоя. Так, например, было сделано в одной из версий параметризации TEB – TEB–SBL (Surface Boundary Layer) [Hamdi and Masson, 2008]. Главное отличие одноуровневых моделей городского подслоя от многоуровневых заключается в том, что нижний уровень атмосферной модели находится над городской застройкой, а влияние вертикальных поверхностей задается только одним турбулентным потоком от поверхности стен. Включение подхода сопротивления состоит в том, что городской каньон делится на несколько дополнительных вертикальных уровней, на каждом из которых решаются полные уравнения для импульса, тепла, влаги и ТКЭ (рис. 5в). Слагаемые в этих уравнениях (делятся на три группы: 1) слагаемые, отвечающие за крупномасштабные процессы – это, например, в уравнении для переноса импульса – сила барического градиента, сила Кориолиса и адвективное слагаемое; 2) слагаемое турбулентной вязкости/теплопроводности/диффузии и 3) слагаемое, характеризующее вклад взаимодействия потока с городской поверхностью [Masson and Seity, 2009]. Члены уравнения, отвечающие за крупномасштабные процессы, считаются постоянными по высоте внутри городского подслоя и равными значениям на нижнем уровне мезомасштабной модели. Турбулентный перенос в вертикальном направлении параметризуется схемой турбулентного замыкания. Слагаемые, отвечающие за вклад городской поверхности, рассчитываются на каждом вертикальном уровне, на которые было дополнительно разбито пространство каньона. Вклад вертикальных стенок в сток импульса из атмосферы и генерацию турбулентности параметризуется так же, как в параметризации ВЕР. Сток импульса из атмосферы за счет горизонтальных поверхностей определяется в соответствии с ТПМО. Параметризация потоков тепла и влаги адаптирована из оригинальной версии ТЕВ (расчет потоков через концепцию сопротивлений) таким образом, чтобы учесть вклад этих потоков на каждом вертикальном уровне. Полные уравнения, рассчитываемые на каждом уровне, выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial \bar{U}_h}{\partial t} = -u \frac{\partial \bar{U}_h}{\partial x}_{LS} - v \frac{\partial \bar{U}_h}{\partial y}_{LS} - \frac{1}{\rho} \nabla_h p_{LS} + \bar{f}_{corLS} - \frac{\partial \bar{U}_h' w'}{\partial z}_{TURB} + \frac{\partial \bar{U}_h}{\partial t}_{URB}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x}_{LS} - v \frac{\partial \theta}{\partial y}_{LS} + Q_{LS} - \frac{\partial \theta' w'}{\partial z}_{TURB} + \frac{\partial \theta}{\partial t}_{URB}, \quad (27)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x}_{LS} - v \frac{\partial q}{\partial y}_{LS} - \frac{\partial q' w'}{\partial z}_{TURB} + \frac{\partial q}{\partial t}_{URB}, \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} = & -u \frac{\partial E}{\partial x}_{LS} - v \frac{\partial E}{\partial y}_{LS} - \overline{u' w'} \frac{\partial u}{\partial z} - \\ & - \overline{v' w'} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\theta} \overline{\theta' w'} - \frac{\partial E' w'}{\partial z}_{TURB} - \varepsilon + \frac{\partial E}{\partial t}_{URB}, \end{aligned} \quad (29)$$

где слагаемые с индексом LS (Large–Scale) определяют крупномасштабные процессы; слагаемые с индексом TURB – турбулентный перенос по вертикали; слагаемые с индексом URB – влияние городской поверхности. В уравнении притока тепла Q обозначает адиабатические источники тепла. В уравнении для ТКЭ слагаемые в правой части определяют соответственно адвекцию, вклад динамических и термических процессов в генерацию ТКЭ, турбулентный перенос, диссипацию ТКЭ и изменение турбулентности за счет городской поверхности.

С одной стороны, применение данного подхода обеспечивает лучшее воспроизведение вертикальной структуры турбулентных потоков, при этом не сильно усложняя структуру и вычислительную сложность городской параметризации. С другой стороны, такая схема не учитывает адвекцию внутри городского подслоя, так как слагаемые, определяющие горизонтальный перенос, предполагаются постоянными внутри каньона, что, в первую очередь, существенно для городской застройки, характеризующейся сильной неоднородностью [Schoetter et al., 2020]. Также к недостаткам этого метода можно добавить методологические проблемы его применения в современных моделях прогноза, где первый вертикальный уровень обычно сильно ниже высоты зданий (часто это 10 м).

Использование подхода объемного сопротивления при расчете турбулентных потоков предполагает параметризацию турбулентного масштаба длины. Крупные турбулентные вихри при контакте с городской поверхностью разрушаются, что приводит к вихрям различного размера над и внутри городского каньона. Одной из разработанных параметризаций, используемой, например, в версиях городских моделей ТЕВ [Lemonsu et al., 2012] и ВЕР [Musetti et al., 2020b], является параметризация [Santiago and Martilli, 2010]. На основе

численных экспериментов с кубиками RANS модели (Reynolds–Averaged Navier–Stokes Equations – усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса) турбулентного потока была разработана параметризация масштаба диссипации вихрей внутри и над городским подслоем как функция от высоты смещения. Предполагается, что внутри городской застройки масштаб диссипации вихрей постоянен, а над каньоном линейно изменяется с коэффициентом α_1 до высоты $z = 1.5H$ и коэффициентом α_2 выше этого уровня.

$$\frac{l_\epsilon}{C} = \alpha_1 (H - d) \quad \text{при} \quad \frac{z}{H} < 1, \quad (30)$$

$$\frac{l_\epsilon}{C} = \alpha_1 (z - d) \quad \text{при} \quad 1 \leq \frac{z}{H} \leq 1.5, \quad (31)$$

$$\frac{l_\epsilon}{C} = \alpha_2 (z - d_2) \quad \text{при} \quad \frac{z}{H} > 1.5, \quad (32)$$

где l_ϵ – турбулентный масштаб диссипации вихрей; C – коэффициент, рассчитываемый в соответствии с параметрами схемы турбулентного замыкания и функций устойчивости Мони́на–Обухова; z – высота над поверхностью; $\alpha_{1,2}$ – коэффициенты, полученные на основе численных экспериментов с RANS моделью; d – высота смещения, определяемая через плотность застройки (A_{urb}): $d = A_{urb}^{0.13} H$.

В интегральных (балк-) параметризациях город с высокими зданиями, деревьями и различными крупными сооружениями характеризуется как поверхность с высоким уровнем шероховатости. В параметризации TERRA_URB влияние городской поверхности на турбулентные потоки происходит через параметр аэродинамической шероховатости, который задается в соответствии с [Sarkar and De Ridder, 2010] и зависит от высоты каньона:

$$z_{0u} = 0.075H. \quad (33)$$

Термическая шероховатость выражается через обратное число Стантона [Kanda et al., 2007]:

$$\ln\left(\frac{z_{0u}}{z_{0h}}\right) = 1.29 \text{Re}_*^4 - 2, \quad (34)$$

где Re_* – число Рейнольдса шероховатости:

$$\text{Re}_* = \frac{u_* z_{0u}}{\nu}, \quad \text{где } u_* \text{ – скорость трения, } \nu \text{ – кинематическая вязкость воздуха.}$$

2.5. Антропогенные потоки тепла и влаги

Влияние непосредственно человеческой деятельности на атмосферу в городской среде может учитываться различными способами. Во-первых, антропогенные потоки тепла и влаги могут добавляться как константы к рассчитываемым потокам

тепла и влаги с урбанизированной поверхности в нижнем граничном условии модели атмосферы [Masson, 2000; Kusaka et al., 2001; Bohnenstengel et al., 2011, 2014, Wouters et al., 2016; Mussetti et al., 2020b]. В параметризации ТЕВ антропогенные потоки от автотранспорта добавляются к потокам тепла и влаги от стен и дороги. Промышленные потоки добавляются к потокам явного и скрытого тепла от поверхности крыш [Masson, 2000]. Характерные значения антропогенных потоков задаются пользователем “вручную” из доступной информации о хозяйственной деятельности в городе. В параметризации TERRA_URB по умолчанию антропогенный поток тепла задается по данным глобального архива [Flanner, 2009], сформированным на основе информации о потреблении энергии из невозобновляемых источников по конкретной стране, где значения потоков учитывают широтную, сезонную и суточную зависимость.

Во-вторых, в моделях городского подслоя могут параметризовываться процессы, происходящие внутри здания. Так, тепло накапливается внутри дома в течение отопительного сезона, а летом внутренняя поверхность здания охлаждается за счет работы кондиционеров. Электроосветительные приборы, компьютеры, бытовая техника, да и сами люди выделяют тепло, нагревая воздух внутри помещения. В самом простом случае эти процессы параметризуются путем задания характерной внутренней температуры здания, которая в качестве граничного условия используется при решении уравнения теплопроводности. Предполагается, что тепло из здания выделяется к поверхностям стен/крыши, а затем в атмосферу через диффузионный поток тепла [Masson, 2000; Martilli et al., 2002]. Например, в оригинальной версии ТЕВ предполагается постоянное значение внутренней температуры зданий, равное 17°C [Masson, 2000]. В следующей версии ТЕВ [Masson et al., 2002] формулировка изменилась на задание эволюции значения температуры внутри здания в течение года. Возможно и более сложное описание внутренних процессов за счет включения в модель городского подслоя модели теплового баланса здания – BEM (Building Energy Model) – например, ТЕВ–BEM, ВЕР–BEM, DСЕР–BEM [Bueno et al., 2012; Salamanca et al., 2010; Jin et al., 2021]. Данная модель непосредственно рассчитывает выделение тепла и влаги при процессах отопления, вентиляции и кондиционирования, потоки тепла и влаги, выделяемые за счет наличия в помещении электрических приборов, людей, освещения и др., учитывая при этом поступление воздуха в здание через неплотности окон и дверей, а также проветривания помещений естественным путем за счет включения в модель здания поверхности окон. На выходе модель ВЕМ предоставляет рассчитанные значения внутрен-

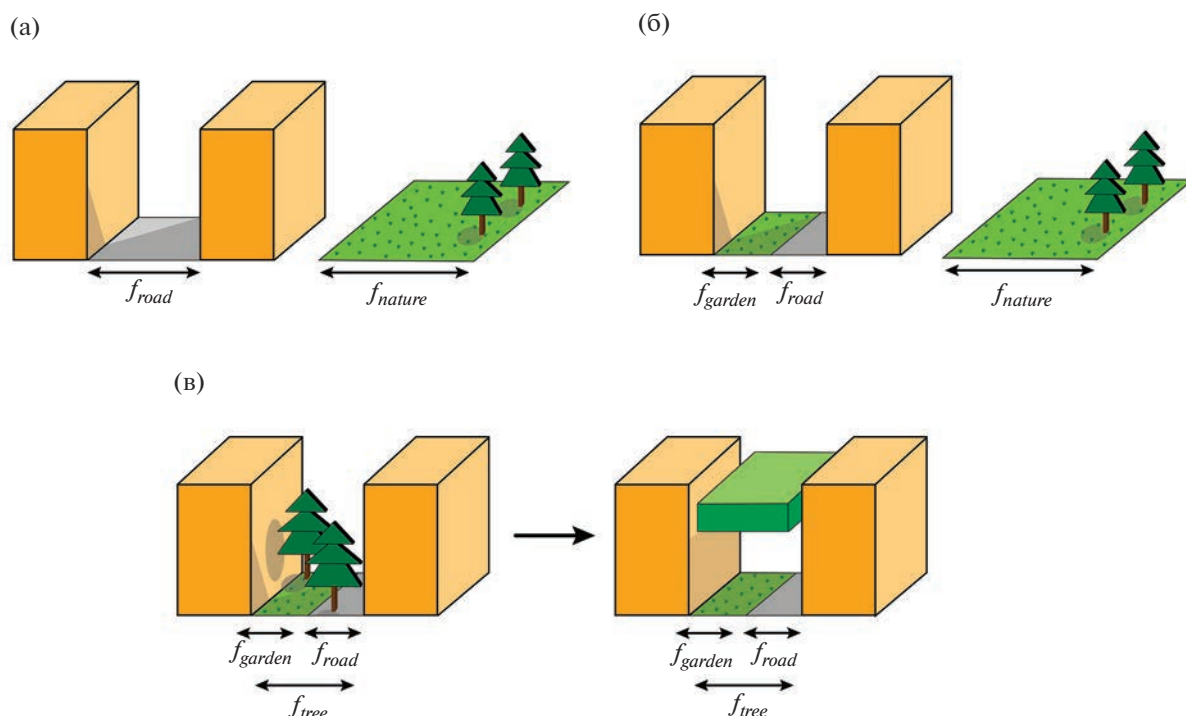


Рис. 7. Схематическое представление городской растительности а) в оригинальных версиях моделей городского подслоя ТЕВ и ВЕР (плиточный подход), б) неявное представление городской растительности в параметризации ТЕВ–Veg, в) трехмерное представление городской растительности (ТЕВ–Tree, ВЕР–Tree). f_{road} , f_{garden} , f_{tree} — доли площади ячейки, занимаемые дорогой, городской растительностью, деревьями в параметризации городского подслоя; f_{nature} — доля ячейки, занимаемая естественной поверхностью.

ней температуры здания, а также потоков скрытого и явного тепла, выделяемых в атмосферу и связанные с общей деятельностью человека внутри здания (в первую очередь отопления и кондиционирования).

В-третьих, городские параметризации могут учитывать и менее очевидные процессы. Например, влияние города на снежный покров. Так, в параметризации ТЕВ учитывается загрязнение автомобилями поверхности снега (эффект грязного снега), за счет увеличения скорости снижения (эволюции) альбедо снега со временем и уменьшения его минимального значения. Также возможен учет работы снегоочистительных машин (если таковые имеются) путем включения зависящего от времени стока снега.

2.6. Городская растительность

Многие районы города характеризуются высокой долей городской растительности: газоны, отдельно стоящие деревья, аллеи влияют на тепловой баланс города [Lemonsu et al., 2012]. Однако, первые версии моделей городского подслоя [Masson, 2000; Martilli et al., 2002] не предполагают растительности внутри городского каньона. Потоки тепла, влаги, радиации и импульса с подстилаю-

щей поверхности рассчитываются в рамках плиточного подхода (tile-approach): для ячеек, занятых урбанизированной поверхностью, вызывается модель городского каньона, для ячеек с естественной поверхностью — схема деятельного слоя суши с учетом растительности (рис. 7а). Тем не менее, исследования [Grimmond et al., 2010; 2011] по сопоставлению городских параметризаций показали, что модели с учетом городской растительности внутри каньона воспроизводят более близкие к реальности значения как восходящих радиационных потоков, так и потоков тепла и влаги с поверхности каньона. Работы последних десяти лет показывают, что одним из основных направлений развития городских параметризаций является “озеленение” городского каньона.

Так, например, в версии параметризации ТЕВ — ТЕВ–Veg [Lemonsu et al., 2012] растительность внутри каньона учитывается в виде плоской поверхности. В этом случае пространство между двумя зданиями частично занимает дорога, частично — естественное покрытие (рис. 7б). Характер растительности (трава/кустарники/деревья) задается через специальные параметры (альбедо, листовой индекс и др.) в схеме растительности для расчета радиационных и турбулентных потоков с этой части поверхности. При этом, трехмер-

ная структура растительности не учитывается при параметризации эффектов затенения (деревья или кустарники не могут отбрасывать тень на дорогу или стену каньона), а также не влияет на вертикальную структуру турбулентных потоков. Более сложным подходом к заданию растительности является включение эффектов трехмерной структуры деревьев (рис. 7в). Например, в версии ТЕВ — ТЕВ—Tree [Redon et al., 2017; 2020] кроны деревьев представляются прямоугольными параллелепипедами с однородной листвой, свойства которой описываются листовым индексом и альбедо. Расположение крон задается через среднюю высоту дерева и среднюю высоту ствола. Наличие деревьев в городском каньоне непосредственно учитывается при расчете радиационных потоков, так как в этом случае кроны деревьев могут частично отражать и поглощать солнечную радиацию и затенять поверхность каньона, а также при моделировании вертикального распределения турбулентных потоков.

Включение вертикальной структуры деревьев во многоуровневой модели городского подслоя впервые было реализовано в параметризации ВЕР [Krayenhoff et al., 2014] для процессов радиационного взаимодействия между городским каньоном и кронами деревьев. Помимо распределения зданий по высоте в новой параметризации задается вертикальное распределение плотности листового индекса внутри каньона и непосредственно над зданиями, благодаря чему влияние деревьев на тепловой баланс поверхности можно исследовать непосредственно как для высотной, так и малоэтажной застройки. Последняя версия параметризации ВЕР—Tree [Krayenhoff et al., 2020] с включенным влиянием высотной растительности на турбулентные потоки [Krayenhoff et al., 2015] была успешно использована для моделирования аномально жарких условий лета 2015 года для города Базель (Швейцария) в сопряжении с климатической версией мезомасштабной модели COSMO—CLM [Musetti et al., 2020b].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Описание особенностей метеорологического режима городов, а также их влияния на атмосферную циркуляцию в моделях погоды и климата возможно с помощью специальных городских параметризаций. В их основе лежит аппроксимация городской поверхности репрезентативным городским каньоном, подразумевающим два здания, стоящие друг напротив друга, и дорогу между ними. Городской каньон вместе с физическими процессами, происходящими внутри городской застройки, может описываться как явным образом (в моделях городского подслоя), так и неявно, с учетом только основных параметров каньона — высоты и ширины — при спецификации параметров подстилаю-

щей поверхности (в slab-моделях). В последнем случае город представляется в виде плоской поверхности с теплофизическими, радиационными и аэродинамическими параметрами, определяемыми типом городской застройки.

Первые городские параметризации возникли в начале 2000-х годов, заложив основные принципы городского моделирования. Классические параметризации городского подслоя, разработанные в начале века, ТЕВ и ВЕР, до сих пор не теряют своей актуальности, так как их дальнейшее развитие идет в соответствии с основными тенденциями развития городских параметризаций. Так, например, в параметризацию ТЕВ была добавлена возможность задания преобладающего азимута каньона [Lemonsu et al., 2012], добавлен блок городской растительности (сначала представленной только на поверхности [Lemonsu et al., 2012], а потом трехмерной структурой [Redon et al., 2017, 2020]), интегрирована модель теплового баланса здания ВЕМ [Bueno et al., 2012] и усовершенствован блок воспроизведения турбулентных потоков (переход с подхода на основе теории приземного лог—слоя к подходу объемного сопротивления) [Hamdi and Masson, 2008; Schoetter et al., 2020]. Похожим образом развивается и многоуровневая модель городского подслоя ВЕР. В нее также была включена модель теплового баланса здания ВЕМ [Salamanca et al., 2010] и встроен блок городской растительности [Krayenhoff et al., 2014; 2020]. Но выделилось и отдельное направление развития, в первую очередь, связанное с совершенствованием расчета радиационных потоков — параметризация двойного каньона DCEP [Schubert et al., 2012].

Усложнение городских параметризаций неминуемо влечет трудности в информационном обеспечении модели внешними полями. Чем больше блоков и процессов описывает параметризация, тем больше необходимо предоставить информации о входных параметрах, которыми характеризуется городская поверхность. А такая информация не всегда существует и нередко требуется разработка методик по определению тех или иных параметров. В этой связи, можно отметить недавно разработанную городскую параметризацию TERRA_URB, которая относится к slab-моделям [Wouters et al., 2015; 2016] и поэтому требует задания небольшого числа параметров поверхности. Несмотря на простоту описания влияния городской поверхности на атмосферу в этой схеме, численные эксперименты с ее использованием показывают хорошие результаты по воспроизведению острова тепла Московской агломерации [Варенцов и др., 2017; Varentsov et al., 2018; 2019].

Одноуровневые городские параметризации SLUCM и MORUSES по способам описания физических процессов во многом похожи на оригина-

Таблица 2. Сопоставление городских параметризаций с точки зрения полноты перечня воспроизводимых процессов/объектов и сложности описания физических процессов/объектов

	TERRA_URB (Wouters, 2015)	TEB (Masson, 2000)	SLUCM (Kusaka, 2001)	MORUSES (Porson, 2010)	BEP (Martilli, 2002)	DCEP (Schubert, 2012)
Радиационный баланс поверхности						
Теплообмен в деятельном слое						
Баланс влаги на поверхности					 (Martilli, 2002) (Zonato, 2021)	
Турбулентный обмен		 (Masson, 2000) (Hamdi, 2008) (Schoetter, 2020)				
Антропогенные потоки		 (Bueno, 2012)			 (Salamanca, 2002)	 (Jin, 2021)
Городская растительность		 (Lemonsu, 2012) (Redon, 2017, 2019)			 (Krayenhoff, 2014, 2015, 2020)	

Полнота описания:
 не описано слабо средне достаточно полно

Сложность описания:
 1 кружочек низкая 2 кружочка средняя 3 кружочка высокая

нальную версию параметризации TEB. Используемые в них физические параметризации охватывают почти все процессы внутри слоя городской застройки с приемлемой вычислительной сложностью, за счет чего использование этих городских параметризаций до сих пор актуально как в исследовательских, так и в оперативных целях.

Городские параметризации различаются не только по степени сложности описания поверхности и физических процессов, но и по перечню описываемых процессов. Например, параметризация баланса влаги на поверхности (резервуаров воды, формирующихся на непроницаемой поверхности после дождя) до последнего времени отсутствовала в параметризации BEP и до сих пор не включена в параметризацию DCEP (табл. 2). С другой стороны, в DCEP максимально подробно описаны физические процессы, связанные с потоками радиации, где все элементы каньона вовлечены в радиационные взаимодействия. Степень описания антропогенных потоков тепла представляется наиболее полной в городской параметризации TEB. Так, помимо возможности включения модели теплового баланса ВЕМ, в модели учитываются антропогенные по-

токи, связанные с промышленностью и транспортом, а также эффекты влияния города на снежный покров.

В течение последних 20 лет развитие городских параметризаций происходит непрерывно. Тем не менее, это развитие можно охарактеризовать больше как экстенсивное. Версии городских параметризаций улучшаются путем учета новых физических процессов и объектов: добавлением модели теплового баланса здания, эффектов городской растительности, улучшением вертикального разрешения для расчета турбулентных потоков и др. Однако базовые формулы, которые были актуальны на момент разработки оригинальной версии той или иной модели, редко пересматриваются. Напротив, получается, что к ним добавляются новые зависимости и эмпирические коэффициенты, никак с ними не связанные. Как это сказывается на качестве модели в целом — вопрос открытый. Эмпирические зависимости присутствуют в формулах для расчета турбулентных потоков, причем многие из них были получены давно и основаны на результатах либо измерительных кампаний, либо лабораторных экспериментов. Остается от-

крытым вопрос надежности и универсальности таких зависимостей.

Таким образом, среди актуальных задач по развитию городских параметризаций можно выделить задачу проверки и уточнения используемых в них (в первую очередь при расчете турбулентных потоков) эмпирических формул – как по отдельности, так и в комплексе. Перспективным подходом представляется использование для этого результатов численного моделирования городской атмосферы в рамках гидродинамических моделей с очень мелким пространственным шагом. Вихреразрешающие модели (LES, Large Eddy Simulation) позволяют явным образом воспроизвести обтекание воздуха городской поверхности с различной конфигурацией зданий (например, [Xie and Castro, 2006; Kanda et al., 2013; Glazunov et al., 2014a, b, 2021; Li et al., 2020; Nazarian et al., 2020]). На основе численных экспериментов с LES моделями были получены статистические характеристики температуры и ветра внутри городской застройки [Glazunov, 2014a, b], разработана параметризация турбулентного масштаба длины [Nazarian et al., 2020; Glazunov et al., 2021], уточнена зависимость между параметрами аэродинамической и термической шероховатости для городских поверхностей [Li et al., 2020]. Результаты LES-моделирования представляются разумной альтернативой для совершенствования описания турбулентных потоков в городских параметризациях как в качестве проверки основных зависимостей параметризации, так и вычисления коэффициентов турбулентного теплообмена между различными элементами каньона и атмосферой.

Обзор литературы по параметризациям выполнен в рамках проекта Министерства науки и высшего образования России (Соглашение № 075-15-2022-284), анализ методов описания отдельных физических блоков при поддержке тематики Научно-технической деятельности Росгидромета, тема Рег. № НИОКТР АААА-А20-120021490079-3, систематизация результатов работы и составление рекомендаций – в рамках проекта научно-образовательной междисциплинарной школы Московского университета “Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 6. С. 25–37.
- Ривин Г.С., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Розинкина И.А., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Захарченко Д.И. Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 33–45.
- Arnfield A.J., Grimmond C.S.B. An Urban Canyon Energy Budget Model and its Application to Urban Storage Heat Flux Modelling // *Energ. Buildings*. 1998. V. 27. P. 61–68.
- Arya S.P. Introduction to Micrometeorology. N.Y.: Academic Press, Inc., 1988. 303 p.
- Bohnenstengel S.I., Evans S., Clark P.A., Belcher S.E. Simulations of the London urban heat island // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2011. V. 137. P. 1625–1640.
- Bohnenstengel S.I., Hamilton I., Davies M., Belcher S.E. Impact of anthropogenic heat emissions on London's temperatures // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2014. V. 140. P. 687–698.
- Bohnenstengel S.I., Hendry M.A. Report on implementation and evaluation of MORUSES in the UKV (PS37) // Met Office, Key Deliverable Report. 2016. P. 1–52.
- Bornstein R., Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. № 3. P. 507–516. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00374-X)
- Bueno B., Pigeon G., Norford L.K., Zibouche K., Marchadier C. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme // *Geoscientific Model Development*. 2012. V. 5. № 2. P. 433–448.
- Chen F., Kusaka H., Bornstein R., Ching J., Grimmond C.S.B., Grossman-Clarke S., Loidan T., Manning K.W., Martilli A., Miao S., Sailor D., Salamanca F., Taha H., Tewari M., Wang X., Wyszogrodzka A., Zhang C. The Integrated WRF/Urban Modelling System: Development, Evaluation, and Applications to Urban Environmental Problems // *Int. J. Climatol.* 2011. V. 31. P. 273–288.
- Clarke J.A. Energy Simulation in Building Design. Bristol: Adam Hilger, 1985. 362 p.
- de la Paz D., Borge R., Martilli A. Assessment of a high resolution annual WRF-BEP/CMAQ simulation for the urban area of Madrid (Spain) // *Atmospheric Environment*. 2016. V. 144. P. 282–296. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.082>
- Feigenwinter C., Vogt R., Parlow E. Vertical Structure of Selected Turbulence Characteristics above an Urban Canopy // *Theor. Appl. Climatol.* 1999. V. 62. P. 51–63.
- Flanner M.G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L02801. <https://doi.org/10.1029/2008GL036465>
- Fortuniak K. Application of a slab surface energy balance model to determine surface parameters for urban areas // *Lund eRep. Phys. Geog.* 2005. V. 5. P. 90–91.
- Garbero V., Milelli M., Bucchignani E., Mercogliano P., Varantsov 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. № 2.

- Garuma G.* Review of urban surface parameterizations for numerical climate models // *Urban Climate*. 2018. V. 24. P. 830–851.
- Glazunov A.* Numerical simulation of stably stratified turbulent flows over an urban surface: Spectra and scales and parameterization of temperature and wind-velocity profiles // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014a. V. 50. № 4. P. 356–368. <https://doi.org/10.1134/S0001433814040148>
- Glazunov A.* Numerical simulation of stably stratified turbulent flows over flat and urban surfaces // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014b. V. 50. № 3. P. 236–245. <https://doi.org/10.1134/S0001433814030037>
- Glazunov A., Debolskiy A., Mortikov E.* Turbulent Length Scale for Multilayer RANS Model of Urban Canopy and Its Evaluation Based on Large-Eddy Simulations // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2021. V. 8. № 4. P. 100–116.
- Grimmond C.S.B., Oke T.* An Evapotranspiration–Interception Model for Urban Areas // *Water Resour. Res.* 1991. V. 27. P. 1739–1755.
- Grimmond C.S.B., Blackett M., Best M., Barlow J., Baik J.-J., Belcher S., Bohnenstengel S.I., Calmet I., Chen F., Dandou A., Fortuniak K., Gouvea M.L., Hamdi R., Hendry M., Kondo H., Krayenhoff S., Lee S.-H., Loridan T., Martilli A., Masson V., Miao S., Oleson K., Pigeon G., Porson A., Salamanca F., Shashua–Bar L., Steeneveld G.-J., Tombrou M., Voogt J., Zhang N.* The international urban energy balance models comparison project: First results from Phase 1 // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2010. V. 49. P. 1268–1292.
- Grimmond C.S.B., Blackett M., Best M., Barlow J., Baik J.-J., Belcher S., Bohnenstengel S.I., Calmet I., Chen F., Dandou A., Fortuniak K., Gouvea M.L., Hamdi R., Hendry M., Kondo H., Krayenhoff S., Lee S.-H., Loridan T., Martilli A., Masson V., Miao S., Oleson K., Pigeon G., Porson A., Salamanca F., Shashua–Bar L., Steeneveld G.-J., Tombrou M., Voogt J., Zhang N.* The international urban energy balance models comparison project: Initial results from Phase 2 // *International J. Climatology*. 2011. V. 31. № 2. P. 244–272.
- Hamdi R., Masson V.* Inclusion of a drag approach in the town energy balance (TEB) scheme: offline 1–d validation in a street canyon // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2008. V. 47. P. 2627–2644.
- Hamdi R., Degrauwe D., Termonia P.* Coupling the Town Energy Balance (TEB) Scheme to an Operational Limited–Area NWP Model: Evaluation for a Highly Urbanized Area in Belgium // *Weather and Forecasting*. 2012. V. 27. № 2. P. 323–344.
- Han J.Y., Baik J.J., Lee H.* Urban impacts on precipitation // *Asia–Pacific J. Atmos. Sci.* 2014. V. 50. № 1. P. 17–30. [10.10a07/s13143-014-0016-7](https://doi.org/10.10a07/s13143-014-0016-7)
- Harman I., Best M., Belcher S.* Radiative exchange in an urban street canyon // *Boundary–Layer Meteorol.* 2004a. V. 110. P. 301–316.
- Harman I., Best M., Belcher S.* Scalar fluxes from urban street canyons. Part II: Model // *Boundary–Layer Meteorol.* 2004b. V. 113. P. 387–410.
- Harman I., Finnigan J.* A simple unified theory for flow in the canopy and roughness sublayer // *Boundary–Layer Meteorology*. 2007. V. 123. P. 339–363.
- Hertwig D., Grimmond S., Hendry M.A., Saunders B., Wang Z., Jeoffrion M., Vidale P., McGuire P., Bohnenstengel S., Ward H., Kotthaus S.* Urban signals in high–resolution weather and climate simulations: role of urban land–surface characterization // *Theor. Appl. Climatol.* 2020. V. 142. P. 701–728.
- Jin L., Schubert S., Fenner D., Meier F., Schneider C.* Integration of a Building Energy Model in an Urban Climate Model and its Application // *Boundary–Layer Meteorology*. 2021. V. 178. P. 249–281.
- Juerges W.* Der waermeuebergang an einer ebenen Wand // *Gesundheits Ingenieur* (“Health Engineer”). 1924. V. 19. P. 5–52.
- Kanda M., Kanega M., Kawai T., Moriwaki R., Sugawara H.* Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2007. V. 46. № 7. P. 1067–1079.
- Kanda M., Inagaki A., Miyamoto T., Gryschka M., Raasch S.* A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces // *Bound.–Layer Meteorol.* 2013. V. 148 № 2. P. 357–377.
- Krayenhoff E., Christen A., Martilli A., Oke T.* A multi–layer radiation model for urban neighbourhoods with trees // *Bound.–Lay. Meteorol.* 2014. V. 151. P. 139–178. <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9883-1>
- Krayenhoff E., Santiago J.-L., Martilli A., Christen A., Oke T.* Parametrization of drag and turbulence for urban neighborhoods with trees // *Bound.–Lay. Meteorol.* 2015. V. 156. P. 157–189. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0028-6>
- Krayenhoff E.S., Jiang T., Christen A., Martilli A., Oke T.R., Bailey B.N., Nazarian N., Voogt J.A., Giometto M.G., Stastny A., Crawford B.R.* A multi–layer urban canopy meteorological model with trees (BEP–Tree): Street tree impacts on pedestrian–level climate // *Urban Climate*. 2020. V. 32. 100590. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100590>
- 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 // *Boundary–Layer Meteorology*. 2001. V. 101. № 3. P. 329–358.
- Kusaka H., Kimura F.* Coupling a single–layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case // *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2004. V. 82. № 1. P. 67–80.
- 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. V. 90B. P. 33–45.
- Lac C., Chaboureaud J.-P., Masson V., Pinty J.-P., Tulet P., Escobar J., Leriche M., Barthe C., Aouizerats B., Augros C., Aumond P., Franck A., Bechtold P., Berthet S., Bielli S., Bosseur F., Caumont O., Cohard J.-M., Colin J., Wautelet P.* Overview of the Meso–NH model version 5.4 and its applications // *Geoscientific Model Development*. 2018. V. 11. P. 1929–1969. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018>
- Lemonsu A., Grimmond C.S.B., Masson V.* Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterra-

- nean City: Marseille // *J. Appl. Meteorol.* 2004. V. 43. P. 312–327.
- Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E., Pearlmutter D.* Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas // *Geosci. Model Dev.* 2012. V. 5. P. 1377–1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>
- Li Q., Bou-Zeid E., Grimmond S., Zilitinkevich S., Katul G.* Revisiting the relation between momentum and scalar roughness lengths of urban surfaces // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. P. 3144–3164. <https://doi.org/10.1002/qj.3839>
- Liu J., Niyogi D.* Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. № 1. P. 7301. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42494-2>
- Louis J.F.* A Parametric Model of Vertical Eddies Fluxes in the Atmosphere // *Boundary-Layer Meteorol.* 1979. V. 17. P. 187–202.
- Martilli A., Clappier A., Rotach M.W.* An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2002. V. 104. P. 261–304.
- Masson V.* A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2000. V. 94. P. 357–397.
- Masson V., Grimmond C.S.B., Oke T.R.* Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities // *J. Appl. Meteorol.* 2002. V. 41. P. 1011–1026.
- Masson V.* Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities // *Theor. Appl. Climatol.* 2006. V. 84. P. 35–45.
- Masson V., Seity Y.* Including Atmospheric Layers in Vegetation and Urban Offline Surface Schemes // *J. Applied Meteorology and Climatology.* 2009. V. 48. № 7. P. 1377–1397.
- Masson V., Le Moigne P., Martin E., Faroux S., Alias A., Alkama R., Belamari S., Barbu A., Boone A., Bouysse F., Brousseau P., Brun E., Calvet J.-C., Carrer D., Decharme B., Delire C., Donier S., Essaouini K., Gibelin A.-L., Giordani H., Habets F., Jidane M., Kerdraon G., Kourzeneva E., Lafaysse M., Lafont S., Lebeaupin Brossier C., Lemonsu A., Mahfouf J.-F., Marguinaud P., Mokhtari M., Morin S., Pigeon G., Salgado R., Seity Y., Taillefer F., Tanguy G., Tulet P., Vincendon B., Vionnet V., Voldoire A.* The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes // *Geoscientific Model Development.* 2013. V. 6. P. 929–960. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>
- Miao S.G., Chen F.* Enhanced modeling of latent heat flux from urban surfaces in the Noah/single-layer urban canopy coupled model // *Science China-Earth Sciences.* 2014. V. 57. P. 2408–2416.
- Mussetti G., Brunner D., Allegrini J., Wicki A., Schubert S., Carmeliet J.* Simulating urban climate at sub-kilometre scale for representing the intra-urban variability of Zurich, Switzerland // *Int. J. Climatol.* 2020. V. 40. P. 458–476. <https://doi.org/10.1002/joc.6221>
- Mussetti G., Brunner D., Henne S., Allegrini J., Krayenhoff E., Schubert S., Feigenwinter C., Vogt R., Wicki A., Carmeliet J.* COSMO-BEP-Tree v1.0: a coupled urban climate model with explicit representation of street trees // *Geoscientific Model Development.* 2020. V. 13. № 3. P. 1685–1710.
- Nazarian N., Krayenhoff E.S., Martilli A.* A one-dimensional model of turbulent flow through “urban” canopies (MLUCM v2.0): updates based on large-eddy simulation // *Geoscientific Model Development.* 2020, V. 13. № 3. P. 937–953. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-937-2020>
- Nunez M., Oke T.R.* The Energy Balance of an Urban Canyon // *Journal of Applied Meteorology.* 1977. V. 16. P. 11–19.
- Oke T.R.* *Boundary Layer Climates*, N.Y.: Routledge, 2nd edition, 1987. 435 p.
- Oke T., Mills G., Christen A., Voogt J.* *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press., 2017. 548 p. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Porson A., Clark P.A., Harman I.N., Best M.J., Belcher S.E.* Implementation of a new urban energy budget scheme in the MetUM. Part I: Description and idealized simulations // *Quarterly J. Royal Meteorological Society.* 2010. V. 136. № 651. P. 1514–1529.
- Raupach M.R., Antonia R.A., Rajagoplan S.* Rough-Wall Turbulent Boundary Layers // *Appl. Mech. Rev.* 1991. V. 44. P. 1–25.
- Redon E., Lemonsu A., Masson V., Morille B., Musy M.* Implementation of street trees in solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0 // *Geoscientific Model Development.* 2017. V. 10. P. 385–411. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-385-2017>
- Redon E., Lemonsu A., Masson V.* An urban trees parameterization for modeling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0) // *Geosci. Model Dev.* 2020. V. 13. P. 385–399. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-385-2020>
- Ribeiro I., Martilli A., Falls M., Zonato A., Villalba G.* Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ // *Atmospheric Research.* 2021. V. 248. 105220. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105220>
- Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Tudrii K.O., Blinov D.V., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Samsonov T.E., Repina I.A., Artamonov A.Yu.* Development of the High-Resolution Operational System for Numerical Prediction of Weather and Severe Weather Events for The Moscow Region // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2020. V. 45. P. 455–465.
- Rizwan A.M., Dennis L.Y.C., Liu C.* A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island // *J. Environ. Sci.* 2008. V. 20. № 1. P. 120–128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
- Rotach M.W.* Profiles of Turbulence Statistics in and above an Urban Street Canyon // *Atmos. Environ.* 1995. V. 29. P. 1473–1486.
- Rowley F.B., Algren A.B., Blackshaw J.L.* Surface Conductances as Affected by Air Velocity, Temperature and Character of Surface // *ASHRAE Trans.* 1930. V. 36. P. 429–446.
- Rowley F.B., Eckley W.A.* Surface Coefficients as Affected by Wind Direction // *ASHRAE Trans.* 1932. V. 38. P. 33–46.

- Rummukainen M.* Added value in regional climate modeling // Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang. 2016. V. 7. № 1. P. 145–159.
- Salamanca F., Krpo A., Martilli A., Alain C.* A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model // Theoretical and Applied Climatology. 2010. V. 99. P. 331–344.
- Salamanca F., Martilli A., Yagüe 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. P. 2372–2386.
<https://doi.org/10.1002/joc.3398>
- Santiago J., Martilli A.* A dynamic urban canopy parameterization for mesoscale models based on computational fluid dynamics Reynolds-averaged Navier-Stokes microscale simulations // Bound.-Layer Meteorol. 2010. V. 137. P. 417–439.
- Sarkar A., De Ridder K.* The urban heat island intensity of Paris: a case study based on a simple urban surface parametrization // Bound.-Layer Meteorol. 2010. V. 138. P. 511–520.
- Schoetter R., Kwok Y., de Munck C., Lau K., Wong W., Masson V.* Multi-layer coupling between SURFEX-TEB-V9.0 and Meso-NH-v5.3 for modelling the urban climate of high-rise cities // Geoscientific Model Development. 2020. V. 13. № 11. P. 5609–5643.
- Schubert S., Grossman-Clarke S., Martilli A.* A Double-Canyon Radiation Scheme for Multi-Layer Urban Canopy Models // Boundary-Layer Meteorology. 2012. V. 145. № 3. P. 439–468.
- Schubert S., Grossman-Clarke S.* Evaluation of the coupled COSMO-CLM/DCEP model with observations from BUBBLE // Q. J. R. Meteorol Soc. 2014. V. 140. № 685. P. 2465–2483.
- Simón-Moral A., Dipankar A., Roth M., Sánchez C., Velasco E., Huang X.-Y.* Application of MORUSES single-layer urban canopy model in a tropical city: Results from Singapore // Q. J. R. Meteorol Soc. 2020. V. 146. P. 576–597.
<https://doi.org/10.1002/qj.3694>
- Smith J.O.* Determination of the Convective Heat Transfer Coefficients from the Surfaces of Buildings within Urban Street Canyons, PhD Thesis, Bath Depart, Waterloo Mech. Eng. Univ. 2010.
- Swaid H.* The Role of Radiative-Convective Interaction in Creating the Microclimate of Urban Street Canyons // Boundary-Layer Meteorol. 1993. V. 64. P. 231–259.
- Trusilova K., Früh B., Brienens S., Walter A., Masson V., Pigeon G., Becker P.* Implementation of an Urban Parameterization Scheme into the Regional Climate Model COSMO-CLM // J. Applied Meteorology and Climatology. 2013. V. 52. № 10. P. 2296–2311.
- UN, 2018. World Urbanization Prospects, United Nations Press. Accessed online from <https://esa.un.org/unpd/wup/>.
- Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P.* Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia // Atmosphere. 2018. V. 9. № 2. P. 50.
<https://doi.org/10.3390/atmos9020050>
- Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 2019. V. 12. № 4. P. 74–95.
- Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M.* Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment // Atmosphere. 2020. V. 11. № 12. P. 1349.
<https://doi.org/10.3390/atmos11121349>
- Vasenev V., Varentsov M., Konstantinov P., Romzaykina O., Kanareykina I., Dvornikova Y., Manukyana V.* Projecting urban heat island effect on the spatial-temporal variation of microbial respiration in urban soils of Moscow megalopolis // Science of the Total Environment. 2021. V. 786. 147457.
- Wang Z., Xiao Z., Tam C.-Y., Pan W., Chen J., Chenxi H., Ren C., Wei W., Yang S.* The projected effects of urbanization and climate change on summer thermal environment in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China // Urban Climate. 2021. V. 37. 100866.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100866>
- Wong K.V., Paddon A., Jimenez A.* Review of World Urban Heat Islands: Many Linked to Increased Mortality // J. Energy Resour. Technol. 2013. V. 135. № 2. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1115/1.4023176>
- Wouters H., Demuzere M., De Ridder K., van Lipzig N.P.* The impact of impervious water-storage parametrization on urban climate modeling // Urban Climate. 2015. V. 11. P. 24–50.
- Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., van Lipzig N.P.* The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modeling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 9. P. 3027–3054.
- Xie Z., Castro I.P.* LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles // Flow, Turbulence and Combustion. 2006. V. 76. № 3. P. 291–312.
<https://doi.org/10.1007/s10494-006-9018-6>
- Yang J., Wang Z.H., Chen F., Miao S., Tewari M., Voogt J., Myint S.* Enhancing Hydrologic Modelling in the Coupled Weather Research and Forecasting-Urban Modelling System // Boundary-Layer Meteorol. 2015. V. 155. P. 87–109.
- Zemtsov S., Shartova N., Varentsov M., Konstantinov P., Kidyeva V., Shchur A., Timonin S., Grishchenko M.* Intraurban social risk and mortality patterns during extreme heat events: A case study of Moscow, 2010–2017 // Health Place. 2020. V. 66. № September. P. 102429.
<https://doi.org/10.1007/s10546-014-9991-6>
<https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2020.102429>

Parameterization of Interaction between the Atmosphere and the Urban Surface: Current State and Prospects

M. A. Tarasova^{1, 2, 3, 5, *}, M. I. Varentsov^{1, 2, 3, 4, 5, **}, and V. M. Stepanenko^{1, 3, 5, ***}

¹*Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, bld. 1, Moscow, 119991 Russia*

²*Hydrometeorological Research Center of Russia, B. Predtechenskiy Per., 11-13, Moscow, 123376 Russia*

³*Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, bld. 4, Moscow, 119234 Russia*

⁴*Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhyovskiy Per., Moscow, 119017 Russia*

⁵*Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: mkolennikova@mail.ru

**e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

***e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Cities have a significant impact on the environment, forming such microclimatic features as an urban heat island, an increase in the intensity of convective weather events, etc. Numerical models of the atmosphere with an integrated block that describes the interaction between the urbanized surface and the atmosphere – urban parameterization – reproduce well the meteorological features of the urban environment. The review studies on urban parameterizations are mostly outdated, and the recent ones do not fully cover aspects of the methods used in the models to describe physical processes. The paper is devoted to updating information on urban parameterizations, comparing the approaches used in them to describe physical processes and forming proposals for their improvement. Based on the most common urban parameterizations of various levels of complexity, the main groups of physical processes describing “urban surface – atmosphere” interaction are identified. They are the surface energy balance, radiation heat transfer, surface moisture balance, turbulent heat and moisture exchange in the urban canopy, anthropogenic influence on heat and moisture fluxes, radiation and turbulent interaction with urban vegetation. The main approaches to parameterization of physical processes defined within each block are described. Modern trends in the development of urban parameterizations are highlighted: 1) over the past 10 years, parameterizations have become more complicated due to the addition of the building energy model, a three-dimensional structure of urban vegetation, and vertical resolution when calculating turbulent fluxes; 2) at the same time, little attention is paid to revising the original empirical formulas, often obtained on the basis of single field or laboratory experiments. Ways to improve urban parameterizations are proposed by clarifying the basic dependencies used mainly in the calculation of turbulent fluxes, particularly, using the results of highly detailed Large-eddy simulation modeling, which, with growing computational power, is increasingly used to simulate explicit heat transfer between the atmosphere and individual elements of the urban environment.

Keywords: urban meteorology, urban parameterizations, atmospheric models