

УДК 551.584.61, 551.588.7, 697.1

## ЗАВИСИМОСТЬ АНТРОПОГЕННОГО ПОТОКА ТЕПЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА (НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА)<sup>1</sup>

© 2021 г. А. С. Гинзбург<sup>a, \*</sup>, И. А. Евсиков<sup>b</sup>, В. А. Фролькис<sup>b, c, d</sup>

<sup>a</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005 Россия

<sup>c</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева, 7, Санкт-Петербург, 194021 Россия

<sup>d</sup>Санкт-Петербургский государственный экономический университет, ул. Садовая, 21, Санкт-Петербург, 191023 Россия

\*E-mail: gin@ifaran.ru

Поступила в редакцию 25.05.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 09.06.2021 г.

Антропогенный поток тепла, связанный с расходом энергии на отопление зданий, оказывает существенное влияние на тепловой баланс урбанизированных территорий и интенсивность городского острова тепла. Энергопотребление городского хозяйства сильно зависит от метеорологических условий, их годового и суточного хода. Особенно это касается той части энергопотребления, которая расходуется на поддержание комфортной температуры внутри помещений. В статье используется открытая веб-картографическая платформа “OpenStreetMap”, которая позволяет провести инвентаризацию потоков антропогенного тепла по разности внутренней и внешней температур воздуха на основе строительных нормы и теплофизических свойств ограждающих конструкций. Сформулирована простая нестационарная модель взаимодействия городского пограничного слоя атмосферы с городским покрывающим слоем, содержащим антропогенные источники тепла.

**Ключевые слова:** энергопотребление городского хозяйства, теплофизические свойства зданий, антропогенный поток тепла, городской покрывающий слой, характеристики отопительного периода, энергобалансовые модели

DOI: 10.31857/S0002351521050060

### ВВЕДЕНИЕ

Воздействию антропогенной эмиссии тепла на атмосферу урбанизированных территорий в последнее время посвящено большое количество публикаций, обзор которых можно найти, например, в статье А.С. Гинзбурга и П.Ф. Демченко (Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2019, № 6). Главной особенностью атмосферы городской агломерации является наличие переходного слоя между поверхностью и верхней границей городских строений — городского покрывающего слоя, в котором происходит тепловое загрязнение городской атмосферы, влияющее на структуру и свойства всего атмосферного пограничного слоя. Выделяемая в атмосферу часть потребляемой энергии, отнесенная к единице площади подстилающей поверхности, называется антропоген-

ным потоком тепла (АПТ) —  $Q_F$  и состоит из потоков тепла от зданий, транспорта и метаболизма живых организмов [1]. На урбанизированных территориях основной вклад в АПТ дает энергопотребление зданий. Состояние современных исследований климата больших городов и роли антропогенного потока тепла подробно описано в [2], а для Москвы в [3].

Энергия, затраченная на поддержание температуры внутри зданий в комфортном диапазоне, поступает в окружающее пространство в виде АПТ. Многочисленные эмпирические оценки и численные эксперименты показали, что АПТ может увеличивать температуру воздуха в городском покрывающем слое, который расположен между поверхностью и огибающей крыш зданий, и давать существенный вклад в интенсивность городского острова тепла, который определяется разностью температур между городскими и прилегающими сельскими территориями. Результаты таких исследований для городов России описаны

<sup>1</sup> Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти акад. А.М. Обухова (Москва, 10–12 ноября 2020 г.).

в работах [4–12] и других публикациях. Зимой интенсивность городского острова тепла на 50–80% определяется наличием антропогенного потока тепла [8].

Доля АПТ, которая связана с энергией, потребляемой внутри зданий, существенно зависит от температуры воздуха снаружи помещений. Из-за влияния температуры атмосферного воздуха на энергопотребление и обратного влияния АПТ на температуру приземного воздуха в режиме отопления возникает отрицательная обратная связь между температурой воздуха и антропогенным потоком тепла. Наиболее современным методом исследования такой обратной связи является использование моделей мезомасштабной циркуляции атмосферы (WRF, COSMO и др.) совместно с моделями городской застройки и городского покрывающего слоя и моделями энергетики зданий.

Воздействие АПТ на атмосферу во многом определяется тем, как этот поток тепла распределяется между компонентами теплового баланса поверхности и городского покрывающего слоя. Часть АПТ передается теплопередачей из помещений в атмосферу через стены и крыши зданий. Если действие АПТ при моделировании атмосферного пограничного слоя ограничивается фиксацией температуры внутри зданий, то учитывается только вклад теплового потока зданий. Эту часть выделяют в отдельное слагаемое – тепловой поток зданий. Он модифицирует поток тепла через подстилающую поверхность, который в уравнении энергетического баланса учитывается как поток теплового накопления и отвечает за тепловую инерцию элементов ландшафта.

Часть АПТ поступает в атмосферу и (частично) в грунт и водные резервуары в виде тепловых стоков от работы систем нагревания. Эта часть АПТ называется потоком теплового стока (WHF – *waste heat flux*). В случае поступления непосредственно в атмосферу, эта часть АПТ дает вклад в атмосферный поток явного и скрытого тепла.

Помимо сезонного хода, взаимодействие городской атмосферы и энергопотребления подвержено и суточному циклу. Это во многом связано с суточным циклом поступающей к поверхности солнечной радиации. Также может давать вклад суточный цикл деловой активности. Численные эксперименты показывают, что максимум реакции температуры воздуха городского покрывающего слоя на АПТ достигается ночью. Аналогичное усиление парникового эффекта в относительно холодное время (ночью и зимой) имеет место при росте концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере [13].

Эффект ночного увеличения реакции на АПТ по численным экспериментам продолжается иногда и в дневное время. Это связано, по-видимому, с комбинированным действием двух факторов. Во-

первых, с сохранением дневных аномалий за счет потока теплового накопления. Во-вторых, с подавлением вертикального перемешивания при переходе к устойчивой стратификации при исчезновении солнечного нагрева поверхности, в частности уменьшения толщины атмосферного перемешанного слоя. Вместе с тем АПТ может приводить и к увеличению толщины перемешанного слоя, в частности, даже полному исчезновению ночной приземной инверсии.

Для оценки антропогенного потока тепла  $Q_F$  как правило, используются три основных подхода: прямые измерения тепловых потоков; инвентаризация, которая заключается в суммировании всех потребителей энергии; дистанционные спутниковые измерения потоков теплового излучения с выделением антропогенных потоков по локальным метеорологическим данным. Эти подходы подробно описаны в [7].

В настоящей статье применяется подход, основанный на альтернативной инвентаризации, в рамках которой антропогенный поток тепла  $Q_F$  рассчитывается на основе строительных норм, теплофизических свойств ограждающих конструкций и разности между внутренней и внешней температурами воздуха на основе открытой веб-картографической платформы “OpenStreetMap” (OSM) [14]. Платформа OSM позволяет описать реальную трехмерную застройку района или города, указать теплофизические свойства ограждающих конструкций отдельных зданий (стен, окон, крыш, подвалов), температуры внутреннего и наружного воздуха и, таким образом, рассчитать антропогенный поток тепла  $Q_F$ .

В данной работе сформулирована простая нестационарная энергетическая модель городского покрывающего слоя атмосферы, учитывающая антропогенные источники тепла и суточный ход температуры наружного воздуха. Эта модель позволяет описывать эффекты теплового взаимодействия энергетики зданий и городского покрывающего слоя.

В рамках проекта РФФИ № 20-05-00254 “Антропогенное воздействие и обратные связи в атмосферном пограничном слое урбанизированных территорий” разрабатывается модель покрывающего слоя городской атмосферы, предназначенная для исследования действия обратных связей и описания антропогенного воздействия на городской пограничный слой атмосферы в мезомасштабных климатических моделях. Основные уравнения такой модели, основанной на работах [15–18] и аналогичных исследованиях, приведены в данной статье.

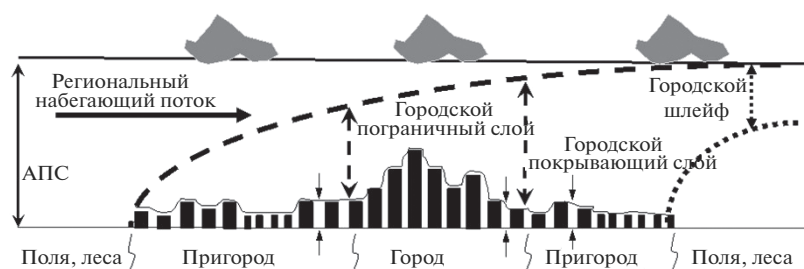


Рис. 1. Городская застройка, покрывающий и пограничный слои атмосферы над урбанизированной территорией.

## ГОРОДСКАЯ ЗАСТРОЙКА И ПОКРЫВАЮЩИЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ

Городская застройка создает внутри пограничного слоя атмосферы так называемый городской покрывающий слой (UCL – *urban canopy layer*). Городской покрывающий слой (полог застройки) простирается от поверхности до средней высоты застройки. В рамках этого слоя на климатические характеристики особенно сильно влияют тепловые свойства зданий и поверхностей и возникающие из-за геометрии зданий и улиц потоки воздуха.

Высота городского покрывающего слоя значительно меньше высоты отдельных зданий, в различных работах для пригородов ее величина составляет менее 10 м, в жилых многоэтажных районах – около 20 м, а в малоэтажном историческом центре города – примерно 10–15 м [19–21].

В данной работе городская застройка описывается с помощью трехмерного моделирования зданий на основе открытой веб-картографической платформы “OpenStreetMap” (OSM) [14]. Проект OSM является online-ресурсом, содержащим картографическую информацию о городской топографии, геометрии и материалах зданий, дорогах, зеленых насаждениях и т.п. База данных хранится на сервере и постоянно обновляется и пополняется благодаря сообществу картографов, ГИС-профессионалов и инженеров. Информацию с OSM платформы можно свободно экспортировать в формате файлов, имеющих xml-структуру. В базе данных OSM структурировано хранятся координаты точек, объединение которых позволяет построить контуры зданий, дорог, границ различных площадок, зеленых насаждений и т.д. Все точки рассматриваемой территории имеют свои уникальные идентификационные номера *id*. Здания определяются атрибутами, описывающими их характеристики. Ключевыми атрибутами являются: адрес, категория, высота, этажность, материалы стен и крыш. Количество атрибутов у разных зданий отличается: не у всех зданий имеется атрибут высоты, чаще указывается этажность, иногда есть информация об арках. Если отсутствует атрибут

высоты, то используется атрибут, отвечающий за этажность здания, на основании которого рассчитывается высота здания (предполагая высоту этажа 3 м). В случае отсутствия обоих атрибутов высота здания может задаваться, например, по данным ГИС ЖКХ [22]. Для построения контуров зданий используют их атрибуты и соответствующие *id* точек. После определения всех атрибутов формируется контур здания и образуется 3-D объект.

Что бы получить 3-D модель застройки региона, на визуальном языке программирования grasshopper написан скрипт, формирующий контуры зданий. При моделировании совокупности строений в смежных зданиях не учитываются примыкающие ограждающие конструкции, т.к. через них не происходит передача тепла.

В качестве примера рассматривается Васильевский остров (В.О.) Санкт-Петербурга, карта которого, полученная по данным OSM, приведена на рис. 2, и город Кудрово, расположенный в Ленинградской области, примыкающий к Санкт-Петербургу район новостроек на востоке и фактически являющийся частью Санкт-Петербургской агломерации.

Для построения 3-D модели застройки рассматриваемая территория разбита на квадратные ячейки площадью  $30 \times 30 \text{ м}^2$ . На рис. 3 показана построенная 3-D модель сооружений Васильев-



Рис. 2. Карта Васильевского острова (В.О.) Санкт-Петербурга, построенная по данным OSM.

ского острова. На переднем плане 1-я линия и Большой проспект Васильевского острова, в правой верхней части видны линии границ р. Смоленки, а примыкающая к ней незастроенная территория – Смоленское кладбище, а также приведена 3-D модель застройки г. Кудрово. Этот рисунок иллюстрирует тонкую структуру городской застройки.

### МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА

Поток тепла от зданий и сооружений состоит из потока теплопроводности, потока вентиляции помещений и потока радиационного теплообмена через окна. Для расчета коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции (стены, окна, крыши и подвалы) необходимо задать ее параметры, т.е. материал, из которого изготовлена конструкция, ее теплофизические характеристики, толщину стены, степень остекления и т.д. Поскольку определение этих параметров для всех сооружений рассматриваемого региона является достаточно громоздкой задачей, то задаются значения теплофизических параметров для стен, окон, крыш и подвалов, которые применяются ко всем рассматриваемым сооружениям. В качестве значений таких параметров используются величины, определяемые на основе требований по тепловой защите зданий, приведенные в строительных нормах [23–27]. Таким образом, рассматривается обратная задача, в которой сопротивление теплопередачи ограждающих конструкций вычисляется по значению “требуемого сопротивления теплопередачи”. В прямой задаче коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции определяется ее конструктивными особенностями и материалом, из которого она сделана, и проверяется на соответствие “требуемому сопротивлению теплопередачи” [23–25].

Согласно сводам правил [23, 25] и ГОСТ [24], сопротивление теплопередачи ограждающей конструкции оценивается по показателю градусо-сутки отопительного периода (ГСОП)

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{от}}) d_{\text{от}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{вн}}$  – расчетная температура внутреннего воздуха здания, а  $t_{\text{от}}$  – средняя температура атмосферного воздуха за время отопительного периода, °С, и  $d_{\text{от}}$  – его продолжительность, сут.

Значение  $t_{\text{от}}$  определяется как среднее по выборке среднесуточных температур, соответствующих отопительному периоду. В соответствии с СП 131.13330.2012 [23] для жилых и общественных зданий отопительный период начинается, когда среднесуточные температуры наружного воздуха не превышают 8°С, а для лечебно-профилактиче-

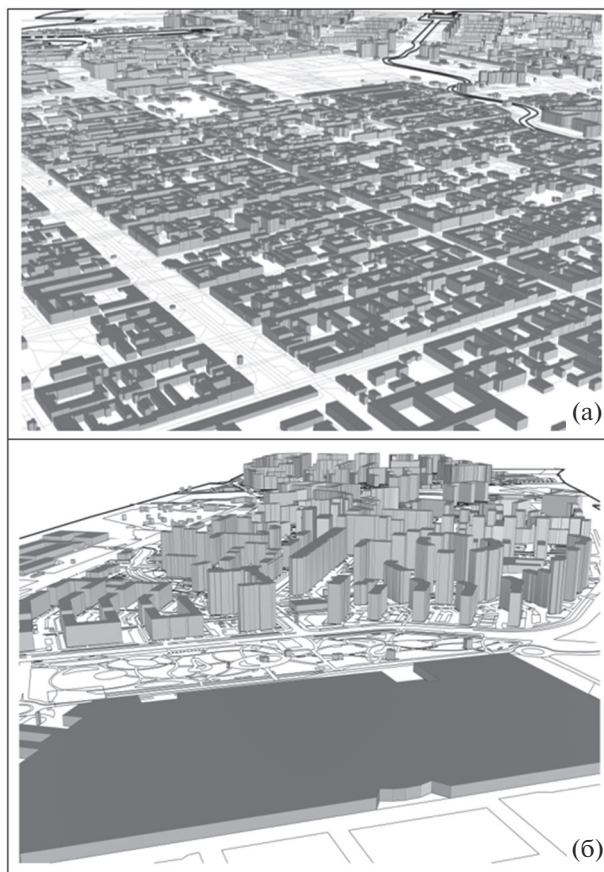


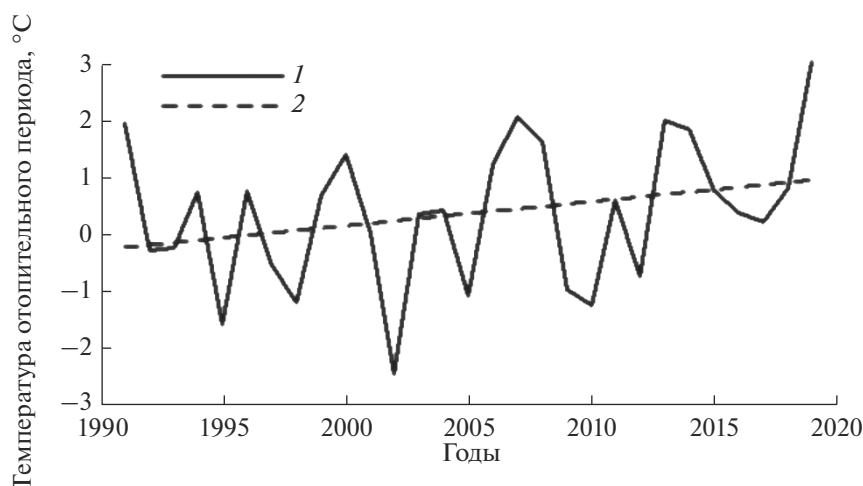
Рис. 3. Трехмерная модель зданий по данным OSM В.О. Санкт-Петербурга (а) и г. Кудрово (б).

ских, детских учреждений и домов-интернатов для престарелых не более 10°С.

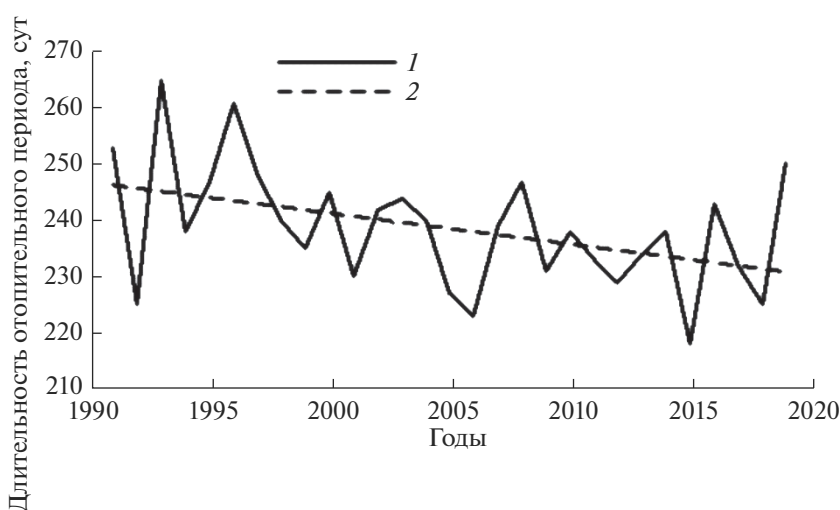
Величина  $t_{\text{вн}}$  – расчетная температура помещений, °С, принимаемая при расчете ограждающих конструкций групп зданий в соответствии с ГОСТом 30494–2011 [24]. Для жилых зданий, общежитий и гостиниц  $t_{\text{вн}}$  должна быть в интервале 20–22°С, для лечебно-профилактических, дошкольных образовательных и общеобразовательных организаций, интернатов в интервале 16–21°С. Исходя из этого, в качестве расчетного значения принимается  $t_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$ .

В Санкт-Петербурге период со средней суточной температурой воздуха, не превышающей 8°С, характеризуется  $t_{\text{от}} = -1.3^\circ\text{C}$ ,  $d_{\text{от}} = 213$  сут, а со средней суточной температурой воздуха не более 10°С имеем  $t_{\text{от}} = -0.4^\circ\text{C}$ ,  $d_{\text{от}} = 213$  сут [23]. Для этих параметров величина ГСОП, согласно (1), будет равна 4537 и 4733 (°С сут) соответственно. Изменения средней температуры отопительного периода, его продолжительности и динамика ГСОП в Санкт-Петербурге за последние три десятилетия представлены на рис. 4–6.

Угловые коэффициенты, приведенные на рис. 4–5, носят исключительно информацион-



**Рис. 4.** Среднегодовая температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) отопительного периода  $t_{\text{от}}$  (1) в Санкт-Петербурге за последние 30 лет и ее тенденция (2) с угловым коэффициентом  $0.42^{\circ}\text{C}/10$  лет.



**Рис. 5.** Продолжительность (сутки) отопительного периода  $d_{\text{от}}$  (1) в Санкт-Петербурге за последние 30 лет и его тенденция (2) с угловым коэффициентом  $5.54$  сут/10 лет.

ный характер, а параметры уравнения регрессии на рис. 6 статистически значимы. Данные, приведенные на рис. 6, показывают, что скорость убывания значения ГСОП по Санкт-Петербургу за последние 30 лет увеличилась, что является еще одним индикатором потепления климата. За рассматриваемый период наблюдаются тенденции увеличения  $t_{\text{от}}$  и уменьшения  $d_{\text{от}}$ . Тренд величины ГСОП обусловлен изменением средней температуры атмосферного воздуха во время отопительного периода  $t_{\text{от}}$  и его продолжительности  $d_{\text{от}}$ .

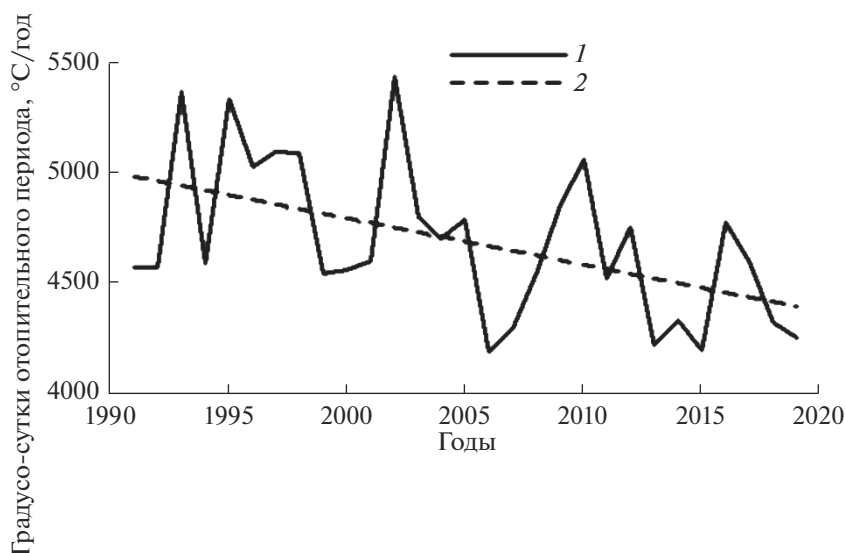
ГСОП используется для потребности в отоплении в городах с централизованными системами отопления, начало и конец работы которых определяются решениями городских администраций. Для оценки полной потребности в отоплении помещений, в том числе и за пределами отопитель-

ного периода (когда, например, используются электрообогреватели, тепловые насосы и пр.), в различных климатических условиях используются так называемые градусо-сутки обогрева (heating degree-days – HDD). Этот подход был использован в работах [5, 11], что позволило проанализировать динамику потребности в теплоснабжении для отопления зданий в крупнейших российских городах, включая Санкт-Петербург.

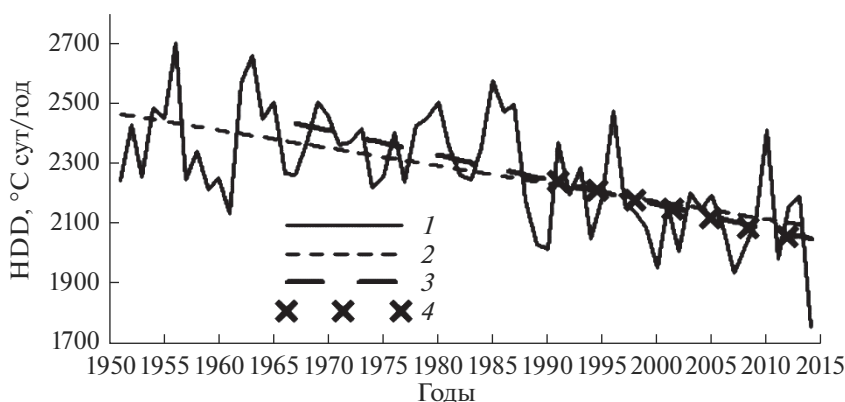
Значение HDD рассчитывается как сумма ежедневных разностей между температурой комфорта внутри помещения (базовой температурой  $-t_k$ )

$$\text{HDD} = \sum_{i=1}^N (t_{k,i} - t_{\text{нар},i}), \quad (1a)$$

где  $N$  – число дней со среднесуточной температурой наружного воздуха  $t_{\text{нар}}$  ниже температуры,



**Рис. 6.** Градуco-сутки ( $^{\circ}\text{C}$  сут/год) отопительного сезона (1) в Санкт-Петербурге за последние 30 лет и их тенденция (2) с угловым коэффициентом  $-210.4^{\circ}\text{C}$  сут/10 лет.



**Рис. 7.** HDD ( $^{\circ}\text{C}$  сут/год) в среднем по городам Евросоюза с середины XX в. по данным, приведенным в [7] (1), его тенденция характеризуется угловым коэффициентом, равным  $-58.95$  за период 1951–2014 (2),  $-81.50$  за период 1967–2014 (3),  $-88.44$  ( $^{\circ}\text{C}$  сут/10 лет) за период 1991–2014 гг. (4).

при которой возникает необходимость использовать отопление.

В России, Канаде, Японии и большинстве стран Европы  $t_k$  принимается равной  $18^{\circ}\text{C}$ , в Великобритании –  $15.5^{\circ}\text{C}$ , а в США –  $18.3^{\circ}\text{C}$  ( $65^{\circ}\text{F}$ ) (см. [7]). Для климатических условий России величины HDD несколько больше значений ГСОП для тех же городов.

В городах России, Европы и Северной Америки с середины XX в. количество HDD и ГСОП заметно убывает. На рис. 7 и 8 в качестве примера приведены изменения HDD за последние десятилетия в среднем по городам Евросоюза и в Санкт-Петербурге.

Тренды (тенденции) HDD, приведенные на рис. 7 и 8, статистически значимы, что демонстри-

рует существенное влияние современного потепления климата на потребность городского хозяйства Санкт-Петербурга в энергии для поддержания необходимого теплового режима помещений. Напомним, что величина HDD зависит от выбранного значения температуры комфорта (в [11] и на рис. 7 и 8 используется  $t_k = 18^{\circ}\text{C}$ ), а значения ГСОП определяются в соответствии со Строительными правилами, в соответствии с которыми  $t_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$ . Ниже используются значения ГСОП, полученные на основе Строительных правил.

Нормативные значения приведенного сопротивления теплопередаче  $R_i^{\text{TP}}$  для разных элементов ограждающих конструкций, соответствующие ГСОП = 4000, равны:  $2.8 \text{ м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  для стен ( $i = 1$ );  $3.7 \text{ м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  для чердачных покрытий и пе-

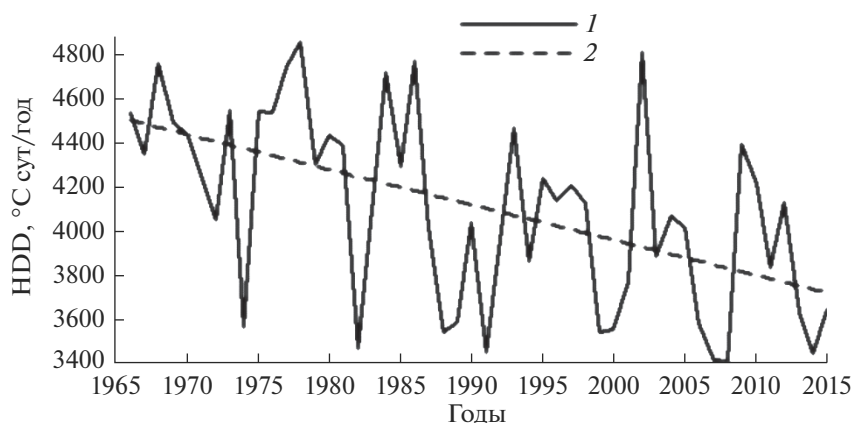


Рис. 8. HDD (1) в Санкт-Петербурге по [11] и их тенденция (2) с угловым коэффициентом  $-158.6^\circ\text{C сут}/10\text{ лет}$ .

рекрытий над неотапливаемыми подпольями и подвалами ( $i = 2$ );  $0.63\text{ м}^2\text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$  для светопрозрачных ограждающих конструкций ( $i = 3$ ), кроме фонарей. Здесь  $i$  – номер категории ограждающей конструкции.

#### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННОГО ПОТОКА ТЕПЛА НА ОСНОВЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСТРОЙКИ

Расчетная сетка, покрывающая рассматриваемую территорию, разбивает ее на ячейки и делит здания на отдельные части, по которым считается суммарный поток тепла  $Q_F$  внутри каждой  $j$ -й ячейки.

Расчет величины АПТ  $Q_F^i$  от разных частей элементов ограждающих конструкций, попадающих в рассматриваемую  $j$ -ю ячейку, осуществляется по формуле:

$$Q_F^i(j) = K_i(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})S_i(j), \quad (2)$$

где  $K_i = 1/R_i^{\text{TP}}$  – коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции  $i$ -й категории,  $t_{\text{нар}}$  – температура наружного воздуха,  $^\circ\text{C}$ ,  $S_i$  – суммарная площадь элементов ограждающей конструкции  $i$ -й категории в  $j$ -й ячейке,  $\text{м}^2$ .

Окончательно, АПТ  $Q_F(j)$  от частей ограждающих конструкций, удовлетворяющих нормативным значениям требуемого сопротивления теплопередаче  $R_i^{\text{TP}}$  и попадающих в  $j$ -ю расчетную ячейку, площадью  $30 \times 30\text{ м}^2$ , определяется соотношением

$$Q_F^i(j) = \sum_{i=1}^3 Q_F^i, \quad (3)$$

которое позволяет оценить среднее значение АПТ  $Q_F^i$  для рассматриваемой территории

$$Q_F^i = \frac{1}{N} \sum_j Q_F^i(j), \quad (4)$$

где  $N$  – количество ячеек расчетной сетки для изучаемого региона.

В результате транспортировки тепла к зданиям по магистралям, расположенным под землей, определенная его доля теряется в виде тепловых стоков  $\Delta Q_{F,g}$ . Следовательно, средний АПТ должен быть увеличен на соответствующую величину теплового стока,

$$Q_F = Q_F^i + \Delta Q_{F,g}. \quad (5)$$

#### РАСЧЕТ АНТРОПОГЕННОГО ПОТОКА ТЕПЛА ДЛЯ КОНКРЕТНЫХ РАЙОНОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Ниже приведены результаты моделирования АПТ для двух районов агломерации СПб: В.О., расположенный на западе, и г. Кудрово, примыкающий к СПб район новостроек на востоке. Эти районы выбраны с учетом преобладающей розы ветров, ориентированной с запада на восток. Расчеты проведены для температур наружного воздуха  $t_{\text{нар}}$  в диапазоне от  $+8$  до  $-30^\circ\text{C}$ . В табл. 1 приведены основные геометрические параметры застройки.

При составлении табл. 1 предполагается, что окна занимают порядка 25% фасада, а 75% фасада приходится на площадь стен. Заметим, что существенное расхождение по высоте среднего и медианного значений для Кудрово обусловлено большим количеством малоэтажных сооружений на его окраинах и высотной жилой застройкой (более 20 этажей). По современным оценкам в СПб при транспортировке тепла через городские

**Таблица 1.** Геометрические параметры застройки Санкт-Петербурга

	Высота, м		Площадь крыш, м <sup>2</sup>	Площадь стен, м <sup>2</sup>	Площадь окон, м <sup>2</sup>	Площадь территории, м <sup>2</sup>	Доля крыш в общей площади
	Среднее	Медиана					
В.О.	11.85	10	3350000	5433000	1811000	18070000	18.54%
Кудрово	19.01	9	693095	1731975	577325	4517000	15.34%

**Таблица 2.** Средний по району АПТ  $Q_F$  (Вт/м<sup>2</sup>) от ограждающих конструкций при различных значениях  $t_{нар}$ 

$t_{нар}$ , °С	+8	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
В.О.	4.63	7.71	9.64	11.56	13.50	15.42	17.35	19.27
Кудрово	5.34	8.90	11.12	13.34	15.57	17.79	20.01	22.23

**Таблица 3.** Средний по зданиям АПТ  $Q_F$  (Вт/м<sup>2</sup>) от ограждающих конструкций при различных значениях  $t_{нар}$ 

$t_{нар}$ , °С	+8	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
В.О.	22.71	37.81	47.25	56.69	66.18	75.62	85.06	94.5
Кудрово	31.62	52.74	65.91	79.07	92.2	105.4	118.6	131.7

магистрали теряется приблизительно 10% тепла, поэтому рассчитанные по территории средние значения АПТ, обусловленные теплопотерями зданий, увеличиваются на (см. (5)),

$$\Delta Q_{F,g} = \beta_g Q'_F, \quad (6)$$

где  $\beta_g = 0.1$ .

В табл. 2 даны оценки средних значений АПТ по рассматриваемым территориям для различных значений  $t_{нар}$  с учетом тепловых потерь в магистралях (6).

Зависимость усредненного по региону АПТ от температуры наружного воздуха может быть описана в виде линейной формулы

$$Q_F = a + b t_{нар}. \quad (7)$$

Для В.О.  $a = 7.711$  Вт/м<sup>2</sup>,  $b = -0.385$  Вт/(м<sup>2</sup> °С); для Кудрово  $a = 8.896$  Вт/м<sup>2</sup>,  $b = -0.445$  Вт/(м<sup>2</sup> °С). В табл. 3 приведены оценки средних значений АПТ  $Q_F$ , рассчитанные только по массиву зданий городской застройки с учетом (5) для рассматриваемых территорий при различных значениях  $t_{нар}$  (без учета тепловых потерь в магистралях).

На рис. 9 и 10 приведены распределения АПТ для В.О. и Кудрово для температур наружного воздуха  $t_{нар}$ , равных +8, -5 и -20 °С.

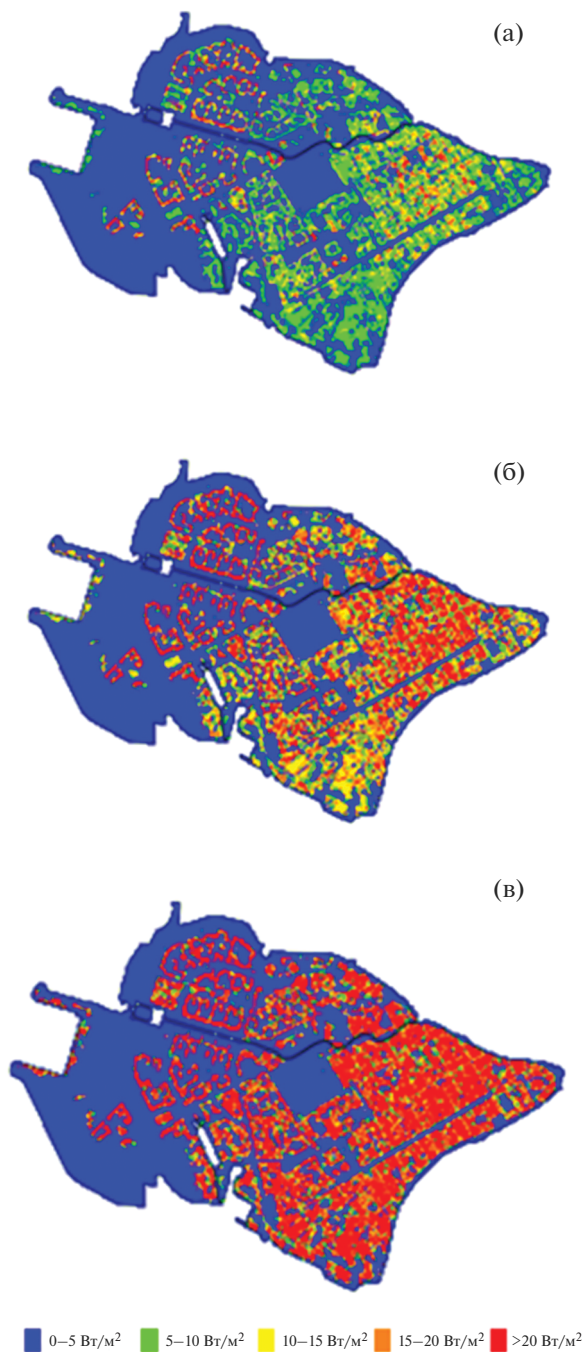
Для определения среднего за зимний период АПТ необходимо найти фактическое распределение температуры наружного воздуха. Используя данные ВНИИГМИ-МЦД [28] по среднесуточной температуре воздуха на метеорологической станции 26063 – Санкт-Петербург за последние тридцать лет, оценена относительная частота дней

с рассматриваемыми температурами в течение отопительного периода за интервал 1991–2020 гг., а также ежегодно.

Среднее значение АПТ по Лондону, Нью-Йорку и Москве (в границах 2011 г.) составляет 25.1, 21.1 и 55.9 Вт/м<sup>2</sup> соответственно [5]. По оценкам, полученным по модели COSMO-CLM (см. [12]), АПТ в разных районах Москвы находится в интервале 27–75 Вт/м<sup>2</sup>: в окрестности МКАД примерно 27 Вт/м<sup>2</sup>; на некоторых территориях, примыкающих к Садовому кольцу, в ~70–75 Вт/м<sup>2</sup>; на остальных территориях ~40–45 Вт/м<sup>2</sup>. Аналогичные оценки для Санкт-Петербурга дают на побережье Финского залива и на территориях, примыкающих к центру города, ~27–30 Вт/м<sup>2</sup>, а в центральных районах ~45–55 Вт/м<sup>2</sup> [12]. Согласно [10] антропогенные потоки тепла за счет центрального отопления в Москве составляют примерно половину от общей величины АПТ. Аналогично в жилых районах Санкт-Петербурге антропогенные потоки тепла за счет центрального отопления оказываются меньше 15 Вт/м<sup>2</sup>. Эти оценки согласуются с предлагаемой методикой. Так, средние значения АПТ за отопительный период в интервале 1991–2020 гг., усредненные по территории, равны для В.О. и Кудрово равны соответственно 7.52 и 8.68 Вт/м<sup>2</sup>, а средние значения АПТ, усредненные по массиву зданий, расположенных на этих территориях, соответственно равны 36.88 и 51.40 Вт/м<sup>2</sup>.

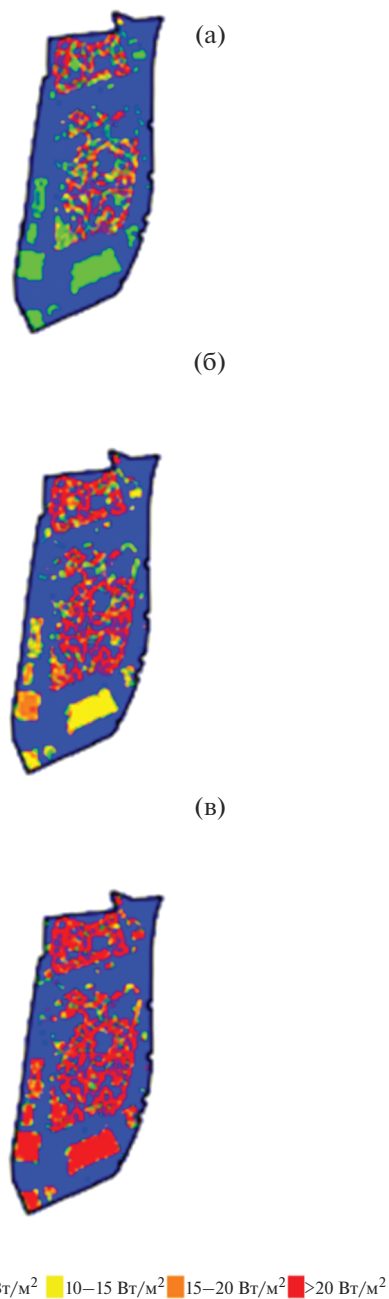
Одна из причин таких значений АПТ на В.О. может быть связана с тем, что основным материалом стен в исторической застройке В.О. является кирпичная кладка, состоящая из 4 кирпичей





**Рис. 9.** Распределение АПТ, обусловленное городской застройкой, на В.О. СПб для температур наружного воздуха: а) 8°C, б) –5°C, в) –20°C.

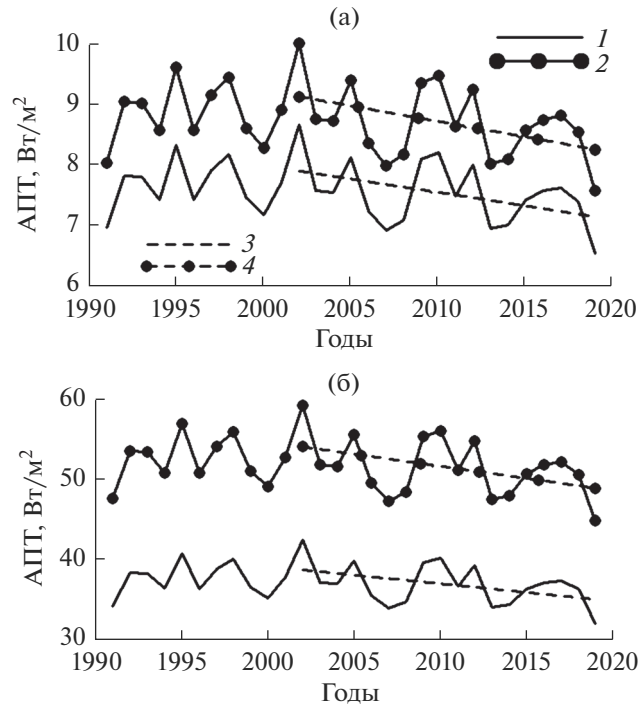
для цокольного этажа или 2.5 кирпичей на уровне карниза здания [29], оказывается ниже современных требований к сопротивлению теплопередачи. Так, например, кирпичная кладка, состоящая из 3 кирпичей, обеспечивает сопротивлению теплопередачи, рассчитанное по СП 50.13330.2012 и равное 1.67 м² °С/Вт, что на 60% меньше современных требований. На рис. 11 представлены среднего-



**Рис. 10.** Распределение АПТ (Вт/м²), обусловленное городской застройкой, в г. Кудрово для температур наружного воздуха: а) 8°C, б) –5°C, в) –20°C.

довые значения АПТ, усредненные по территории (рис. 11а) и по массиву застройки (рис. 11б) для В.О. СПб и Кудрово за период 1991–2020 гг.

Для более корректных оценок необходимо учитывать год постройки зданий и использовать соответствующие нормативы, которые за последние десятилетия существенно изменились. Такой подход описан, например, в [30], и его планируется использовать в дальнейшей работе.



**Рис. 11.** Среднегодовые значения АПТ: а) по территории и б) по массиву застройки за период 1991–2020 гг. для (1) В.О. СПб и (2) Кудрово; тенденция АПТ за период 2002–2020 гг. по территории (3, а) В.О. СПб и (4, а) Кудрово описывается угловым коэффициентом 0.44 и –0.51, а по массиву застройки –2.17 и –3.02 (Вт/м<sup>2</sup>)/10 лет соответственно.

**ЭНЕРГОБАЛАНСОВАЯ МОДЕЛЬ ГОРОДСКОГО ПОКРЫВАЮЩЕГО СЛОЯ**

Рассмотрим энергобалансовую модель городского покрывающего слоя (UCL – *urban canopy layer*). Уравнение притока тепла для случая пренебрежения горизонтальной адвекцией тепла внутри UCL имеет вид

$$\rho c_p \frac{\partial T(z)}{\partial t} = \text{div}(Q^*(z) + Q_H(z) + Q_E(z) + q_F(z)), \quad (8)$$

где  $Q^*$  – эффективный интегральный радиационный поток,  $Q_H$  и  $Q_E$  – потоки явного и скрытого тепла,  $q_F$  – антропогенный приток тепла, обусловленный городской застройкой,  $\rho$  – плотность и  $c_p$  – теплоемкость воздуха.

Интегрируя (8) по вертикали от поверхности до высоты верхней границы UCL– $h_{CL}$  и пренебрегая горизонтальными изменениями, получаем уравнение притока тепла к UCL

$$\rho c_p h_{CL} \frac{\partial T_{CL}}{\partial t} = (Q_{CL}^* - Q_0^*) + (Q_{H,CL} - Q_{H,0}) + (Q_{E,CL} - Q_{E,0}) + Q_F', \quad (9)$$

где  $T_{CL}$  – температура UCL;  $Q_F' = \int_0^{h_{CL}} q_F(z) dz$  – антропогенный поток тепла к UCL; индексами  $CL$  и

0 обозначены потоки на верхней и нижней границах UCL.

Граничное условие на подстилающей поверхности получим, интегрируя (8) по толщине деятельного слоя,

$$c_g h_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = Q_0^* + Q_{H,0} + Q_{E,0} + \Delta Q_{F,g}, \quad (10)$$

где  $c_g$ ,  $h_g$  и  $T_g$  – теплоемкость, толщина и температура деятельного слоя подстилающей поверхности;  $\Delta Q_{F,g}$  – АПТ, выделяющийся в поверхностном деятельном.

Заменяя температуру деятельного слоя  $T_g$  температурой поверхности  $T_0$  и объединяя (9) и (10), приходим к уравнению, определяющему эволюцию  $T_{CL}$ .

$$\rho c_p h_{CL} \frac{\partial T_{CL}}{\partial t} = Q_{CL}^* + Q_{H,CL} + Q_{E,CL} - c_g h_g \frac{\partial T_0}{\partial t} + Q_F' + \Delta Q_{F,g}, \quad (11)$$

где предполагается, что  $\Delta Q_{F,g} = \beta_g Q_F'$ ,  $\beta_g$  – коэффициент, характеризующий потери на подземных коммуникациях.

Верхняя граница UCL состоит из поверхностей крыш и некоторой огибающей пространство

между зданиями (более мелкие детали не рассматриваются), поэтому  $Q_F$  можно детализировать, явно вводя антропогенный поток тепла  $\Delta Q_{F,CL} = \beta_{CL} Q'_F$ , проходящий через крыши в примыкающий приземный слой атмосферы, где  $\beta_{CL}$  — коэффициент пропорциональности. Тогда

$$Q'_F = (1 - \beta_{CL})Q'_F + \beta_{CL}Q'_F. \quad (12)$$

Здесь подразумевается, что антропогенный поток тепла с крыш сразу попадает в примыкающий приземный слой атмосферы. Коэффициент  $\beta_{CL} < 1$  показывает часть АПТ, которая попадает в окружающую среду через крышу, непосредственно формируя вертикальный поток тепла на верхней границе UCL, а  $(1 - \beta_{CL})$  определяет АПТ от боковых ограждающих конструкций непосредственно внутри острова тепла.

Таким образом, уравнение притока тепла к UCL можно представить как

$$\begin{aligned} \rho c_p h_{CL} \frac{\partial T_{CL}}{\partial t} = Q_{CL}^* + Q_{H,CL} + Q_{E,CL} - \\ - c_g \frac{\partial T_0}{\partial t} + (1 - \beta_{CL})Q'_F + \beta_{CL}Q'_F + \beta_g Q'_F, \end{aligned} \quad (13)$$

где полное значение АПТ определяется соотношением

$$Q_F = Q'_F + \Delta Q'_{F,g}. \quad (14)$$

Коэффициент  $\beta_{CL}$  можно оценить по табл. 2 при помощи формулы

$$\beta_{CL} = \frac{K_2 S_2}{K_1 S_1 + 2K_2 S_2 + K_3 S_3}, \quad (15)$$

где  $K_i$  — коэффициент теплопередачи  $i$ -й категории ограждающей конструкции,  $S_i$  — их суммарные площади,  $i = 1$  соответствует стенам,  $2$  — крышам и подвалам,  $3$  — окнам. Для В.О. СПб и Кудрово  $\beta_{CL}$  равен 0.14 и 0.10 соответственно.

В рамках предлагаемой модели предполагается в условиях городской агломерации учесть не только сезонный, но и суточный ход АПТ, а также рассмотреть различные способы параметризации вертикального турбулентного потока тепла и оценить взаимодействие UCL с пограничным слоем атмосферы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данной статье оценки роли теплофизических свойств зданий и сооружений на антропогенный поток тепла в покрывающем городском слое атмосферы (на примере ряда го-

родских районов Санкт-Петербургской агломерации) показывают, как осуществляется взаимное влияние параметров городской застройки и изменяющегося климата.

Климатические характеристики, такие как температура и продолжительность отопительного периода, определяют в краткосрочной перспективе планируемое энергопотребление городского хозяйства, а в долгосрочной перспективе — требования к теплофизическим свойствам зданий и сооружений.

Со своей стороны теплофизические свойства зданий и сооружений играют определяющую роль в формировании антропогенного потока тепла и структуры городского покрывающего слоя атмосферы.

Предложенная в статье простая энергобалансовая модель городского покрывающего слоя может быть использована в мезомасштабных климатических и прогностических моделях для параметризации потоков энергии с урбанизированной подстилающей поверхности в пограничный слой атмосферы.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-05-00254. Авторы благодарят рецензента за конструктивные замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allen L., Lindberg F., Grimmond C.S.B. Global city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability // Int. J. Climatol. 2011. V. 31. P. 1990–2005.
2. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban Climates. Cambridge Univ. Press, 2017. 510 p.
3. Кислов А.В. и др. Климат Москвы в условиях глобального потепления. Изд-во МГУ, 2017. 320 с.
4. Гаврилова Ю.В., Смышляев С.П., Махура А.Г. Модельное исследование влияния крупных городов на региональные аспекты погоды // Ученые записки РГМУ. 2010. № 15. С. 107–116.
5. Гинзбург А.С., Белова И.Н., Расплетина Н.В. Антропогенные потоки тепла в городских агломерациях // ДАН. 2011. Т. 439. № 2. С. 256–259.
6. Александров Г.Г., Белова И.Н., Гинзбург А.С. Антропогенные потоки тепла в столичных агломерациях России и Китая // ДАН. 2014. Т. 457. № 1. С. 101–106.
7. Гинзбург А.С., Решетарь О.А., Белова И.Н. Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 20–27.
8. Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 17573–1758.
9. Ginzburg A.S., Dokukin S.A. Numerical modeling of anthropogenic heat flux impact on air temperature in Moscow in wintertime // IOP Conf. Series: Earth and

- Environmental Science. 2018. V. 211.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012019>
10. Alexandrov G.G., Ginzburg A.S. Anthropogenic impact of Moscow district heating system on urban environment // Energy Procedia. 2018. V. 149. P. 161–169.
  11. Belova I.N., Ginzburg A.S., Krivenok L.A. Heating seasons length and degree days trends in Russian cities during last half century // Energy Procedia. 2018. V. 149. P. 373–379.
  12. Dokukin S.A., Ginzburg A.S. The influence of anthropogenic heat fluxes on the temperature and wind regimes of the Moscow and St. Petersburg regions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 606.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012010> (2020) 012010
  13. Демченко П.Ф., Голицын Г.С., Гинзбург А.С., Вельтищев Н.Н. Оценка суточного цикла парникового эффекта CO<sub>2</sub> по одномерным моделям вертикальной структуры атмосферы // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 5. С. 595–600.
  14. OpenStreetMap. — URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 29.03.2021).
  15. Salamanca F, Krpo A, Martilli A, Clappier A. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations — Part I. Formulation, verification, and a sensitive analysis of the model // Theor. Appl. Climatol. 2010. V. 99. P. 331–344.
  16. Bueno B., Roth M., Norford L., Li R. Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighborhood scale // Urban Climate. 2014. V. 9. P. 35–53.
  17. Kanda M., Kawai T., Kanega M., Moriwaki R., Narita K., Hagishima A. A simple energy balance model for regular building array // Boundary-Layer Meteorol. 2005. V. 116. P. 423–443.
  18. Ma S., Pitman A., Hart M., Evans J.P., Haghdad N., MacGill I. The impact of an urban canopy and anthropogenic heat fluxes on Sydney's climate // Int. J. Climatol. 2017. V. 37. P. 255–270.
  19. Xiaodong He, Yuhuan Li, Xinran Wang, Liang Chen, Bu Yu, Yizhou Zhang, Shiguang Miao High-resolution dataset of urban canopy parameters for Beijing and its application to the integrated WRF/Urban modelling system // J. Cleaner Production. 2019. V. 208 P. 373–383.
  20. Balogh M., Kristof G. Fine scale simulation of turbulent flows in urban canopy layers // Quarterly J. of Hungarian Met. Service. 2010. V. 1. № 1–2. P. 135–148.
  21. Huq P., Carrillo A., White L.A., Redondo J., Dharmavaram S., Hanna S.R. The shear layer above and in urban canopies // J. Applied Meteorology and Climatology. 2007. V. 46. P. 368–376.  
<https://doi.org/10.1175/JAM2469.1>
  22. Государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства (ГИС ЖКХ). — URL: <https://dom.gosuslugi.ru> (дата обращения: 29.03.2021).
  23. Свод правил. Строительная климатология (СП 131.13330.2012). — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546> (дата обращения: 29.03.2021).
  24. Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях (ГОСТ 30494-2011). — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095053> (дата обращения: 29.03.2021).
  25. Свод правил. Тепловая защита зданий (СП 50.13330.2012). — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 29.03.2021).
  26. Малявина Е.Г. Теплотери здания: справочное пособие. М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. 144 с.
  27. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М.: Высш. школа, 1982. 415 с.
  28. Единый государственный фонд данных ВНИИГМИ-МЦД. — URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 29.03.2021).
  29. Головина С.Г. Архитектурно-конструктивные особенности жилых зданий Санкт-Петербурга второй половины XVIII века // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. № 2. С. 71–77.  
<https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.02.10>
  30. Andrić I., Fournier J., Lacarrière B., Le Corre O., Ferrão P. The impact of global warming and building renovation measures on district heating system techno-economic parameters // Energy. 2018. V. 150. P. 926–937.

## Anthropogenic Heat Flux Dependence on Air Temperature (on the Example of St. Petersburg)

A. S. Ginzburg<sup>1,\*</sup>, I. A. Evsikov<sup>2</sup>, and V. A. Frolkis<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
Vtoraya Krasnoarmeiskaya str., 4, Saint Petersburg, 190005 Russia

<sup>3</sup>Voeikov Main Geophysical Observatory, Karbysheva str., 7, Saint Petersburg, 194021 Russia

<sup>4</sup>Saint Petersburg State University of Economy, Sadovaya str., 21, Saint Petersburg, 191023 Russia

\*e-mail: gin@ifaran.ru

The anthropogenic heat flux associated with the energy consumption for buildings heating has a significant impact on the heat balance of urbanized areas and the intensity of the urban heat island. The energy

consumption of the urban economy is highly dependent on meteorological conditions, their annual and daily trend, and variations. This is especially true for the part of energy consumption that is spent on maintaining a comfortable indoor temperature. The article uses the open web mapping platform “OpenStreetMap”, which allows you to make an inventory of anthropogenic heat fluxes using the difference between internal and external air temperatures and based on building codes and thermophysical properties of enclosing structures. A simple nonstationary energy balance model of the interaction of the urban boundary layer of the atmosphere with the urban canopy layer containing anthropogenic heat sources is formulated.

**Keywords:** energy consumption of urban economy, thermophysical properties of buildings, anthropogenic heat flux, urban canopy layer, characteristics of the heating period, energy balance models