

Научная статья

УДК 519.688

DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-2-20-32

Информационные технологии для расчета антропогенного потока тепла в условиях городской застройки

Игорь Александрович Евсиков

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова,
Санкт-Петербург, Россия

ievnikov@lan.spbgasu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4793-2975>

Аннотация

Современные города сталкиваются с необходимостью эффективного управления энергоресурсами и минимизацией воздействия человеческой деятельности на окружающую среду. Одним из значимых аспектов антропогенного воздействия является тепловой поток, порождаемый зданиями, транспортом и промышленностью. В статье представлен комплекс программ для оценки антропогенного потока тепла (АПТ), вызванного теплопотерями зданий в отопительный период. Исследование основано на пространственной геометрической модели города, построенной с использованием данных OpenStreetMap. Теплофизические свойства ограждающих конструкций и удельные характеристики расхода тепловой энергии получены из строительных норм. Предложенный метод включает этапы моделирования зданий, фильтрации, дополнения информации из Яндекс Карт и ГИС ЖКХ, устранения коллизий, присвоения удельных характеристик и расчета АПТ. Реализация метода осуществлена через скрипты для платформы Rhinoceros, известной своим широким функционалом и визуальной средой программирования Grasshopper. Предложенный подход позволяет эффективно анализировать и визуализировать антропогенный поток тепла в городах, что является ключевым шагом в разработке стратегий устойчивого управления энергоресурсами и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова

модель городской застройки, геоинформационные системы, OpenStreetMap, Яндекс Карты, ГИС ЖКХ, строительные нормы и правила

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2022 г. № 3240–р) в рамках НИР «Расширение системы климатического и экологического мониторинга и прогнозирования на территории России в целях обеспечения адаптационных решений в отраслевом и региональном разрезе, включая борьбу с опустыниванием».

Для цитирования

Евсиков И. А. Информационные технологии для расчета антропогенного потока тепла в условиях городской застройки // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2024. Т. 22, № 2. С. 20–32. DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-2-20-32

© Евсиков И. А., 2024

Information Technologies for Calculating Anthropogenic Heat Flux in Urban Areas

Igor A. Evsikov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russian Federation
ievnikov@lan.spbgasu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4793-2975>

Abstract

Modern megalopolis face challenges in effectively managing energy resources and minimizing the impact of human activities on the environment. One of the significant aspects of anthropogenic impact is the heat flow generated by buildings, transport and industry. This article presents a set of programs for assessing anthropogenic heat flow (AHF) caused by heat loss from buildings during the heating season. The study is based on a spatial geometric model of the city constructed using OpenStreetMap data. The thermophysical properties of enclosing structures and specific characteristics of thermal energy consumption are obtained from building codes. The proposed method includes the stages of buildings modeling, filtering, supplementing information from Yandex Maps and State Information System of Housing and Communal Services, eliminating collisions, assigning specific characteristics and calculating AHF. The method is implemented through scripts for the Rhinoceros platform, known for its wide functionality and visual programming environment Grasshopper. The proposed approach allows us to effectively analyze and visualize anthropogenic heat flow in cities, which is a key step in developing strategies for sustainable energy management and reducing negative environmental impacts.

Keywords

Urban development model, geographic information systems, OpenStreetMap, Yandex Maps, State Information System of Housing and Communal Services, building codes and regulations

Funding

The research was carried out with the support of the most important innovative project of state importance “Unified national system for monitoring of climatically active substances” (Russian Federation Government Order No. 3240-p dated October 29, 2022) within the framework of the R&D “Expansion of the system of climatic and environmental monitoring and Expansion of the system of climatic and environmental monitoring and forecasting on the territory of Russia in order to provide adaptation solutions in the sectoral and regional context, including combating desertification”.

For citation

Evsikov I. A. Information technologies for calculating anthropogenic heat flux in urban areas. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2024, vol. 22, no. 2, pp. 20–32 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-2-20-32

Введение

Современные города сталкиваются с неизбежной потребностью в эффективном управлении энергоресурсами и снижении воздействия человеческой деятельности на окружающую среду. Одним из ключевых аспектов антропогенного воздействия является тепловой поток, создаваемый различными источниками, такими как здания, транспорт и промышленность. Зимой, согласно мезомасштабным атмосферным моделям, в некоторых случаях влияние антропогенных тепловых выбросов на интенсивность городского острова тепла может составлять от 50 до 80 % [1], а разность температур в городе и на окраине может достигать до 10 °C [2; 3]. Непосредственно на здания приходится от 50 до 65 % от общей тепловой эмиссии, в зависимости от сезона и особенностей конкретного города [4].

Использование информационных технологий оказывается полезным для расчета антропогенного потока тепла (АПТ), так как их применение позволяет построить модель городской застройки, на основе которой можно оценить тепловую эмиссию от зданий. В последние годы развитие информационного моделирования зданий и геоинформационных технологий, привели к появлению метода оценки АПТ «снизу вверх». Например, модели городского погранично-го слоя с интегрированными моделями энергопотребления зданий, такими как ВЕР + ВЕМ [4]

и DCEP [5]. В рамках такого подхода рассматриваются некоторые типы зданий, для которых из различных источников собирается информация об изменении их энергетического баланса с течением времени и вычисляется АПТ, а затем предполагается, что однотипные здания генерируют со временем такой же поток. Такие подходы обеспечивают достаточно высокую точность, но требуют детальных данных о зданиях и больших вычислительных ресурсов. Однако в настоящее время такой подход реализован только для городов Бостон и Берлин.

В данной работе предлагается другой вариант расчета АПТ «снизу вверх» на основе действующих строительных норм, для реализации которого необходима информация о геометрии городских зданий, а точнее, о площади ограждающих конструкций и объемах зданий.

Существует множество геоинформационных сервисов, таких как Яндекс Карты¹, Google Maps, 2ГИС, OpenStreetMap² (OSM) и другие, позволяющие визуализировать городскую застройку. Однако перечисленные сервисы за исключением OSM являются закрытыми системами, не разрешающими использовать информацию о геометрии строений, что, в свою очередь, не дает возможность оценить необходимые площади и объемы зданий. Знание площади ограждающей конструкции здания в совокупности с сопротивлением ее теплопередаче или объема здания вместе с удельной характеристикой расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию позволяет рассчитать АПТ. Суммируя потоки тепла от всех зданий, получается полный поток тепла, генерируемый городом, а учитывая пространственное расположение зданий, находим распределение АПТ по территории города.

Для того чтобы оценить требуемые площади и объемы, написана программа (скрипт) на Python, собирающая геометрическую и географическую информацию из OSM. Скрипт использует библиотеку «OSMnx³», которая преобразует XML-данные OSM в табличную структуру данных GeoDataFrame и позволяет сохранить результат в формате геопространственных векторных данных, таких как shapefile, geojson, georackage, включая сопутствующую информацию об объектах (название, адрес, высоту, тип, материал, и т. п.). На основе shapefile строится геометрическая модель города в программе трехмерного моделирования Rhinoceros с помощью визуальной среды программирования Grasshopper, причем shapefile оказался более удобным для работы в среде Rhinoceros.

В OSM информация о высоте и этажности есть не у всех зданий. Восполнить недостающую информацию можно, например, из сервисов Яндекс Карт и ГИС ЖКХ⁴. В некоторых случаях высота здания доступна напрямую из сервиса Яндекс Карт через сайт «Народная карта»⁵, где для каждого здания доступна карточка с информацией о его адресе, типе и высоте. Однако такую информацию можно получить только визуально, без возможности автоматизировать ее сбор с последующим сохранением. При отсутствии данных о высоте здания на сайте «Народная карта» используется информация ГИС ЖКХ. На сайте ГИС ЖКХ в некоторых случаях имеется информация о количестве этажей, дате ввода в эксплуатацию, серии/типе проекта здания и т. п., но такая информация доступна только на первых 19 страницах результатов поиска, что дает 1900 записей. Чтобы обойти эту проблему, формируется запрос напрямую к серверу ГИС ЖКХ по «Глобальному уникальному идентификатору дома по ФИАС» (ГУИД), что позволяет получить полную информацию из базы данных ГИС ЖКХ. Таким образом, для некоторых зданий удается определить количество этажей. Знание высоты здания позволяет определить его объем и площадь ограждающих конструкций.

Таким образом, задача заключается в построении геометрической модели города, позволяющей оценить АПТ. Предполагая, что здания соответствуют действующим строительным нормам, разработаны два алгоритма расчета АПТ, описанные в [6; 7]. Для расчета по первому

¹ <https://yandex.ru/maps-api/>

² <https://www.openstreetmap.org>

³ <https://osmnx.readthedocs.io>

⁴ <https://dom.gosuslugi.ru/#!/houses>

⁵ <https://n.maps.yandex.ru/>

алгоритму в модель городской застройки вносится информация о коэффициентах теплопередачи ограждающих конструкций, одинаковая для всех зданий внутри одного города. Второй алгоритм учитывает высоту и тип здания, поэтому в рамках второго подхода необходимо каждому объекту добавить информацию об удельной характеристике расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию. Оценка АПТ происходит с учетом разности температур воздуха снаружи и внутри здания.

Этапы построения модели городской застройки

Построение модели для расчета АПТ состоит из нескольких этапов:

- 1) моделирование контуров зданий и наполнение атрибутов (высота, этажность, тип здания);
- 2) фильтрация по площади и по типу;
- 3) дополнение информации из Яндекс Карт и ГИС ЖКХ;
- 4) устранение коллизий (пересечений);
- 5) добавление теплофизических свойств;
- 6) разделение контуров зданий по расчетной сетке.

Часть этапов выполнена в виде отдельных монофункциональных программ (скриптов) для платформы Rhinoceros на языке программирования Python. Другая часть этапов реализована в визуальной среде программирования Grasshopper, встроенной в Rhinoceros. Grasshopper ускоряет процесс программирования, так как уже содержит готовые функциональные блоки – «ноды». При этом создаваемая программа становится более наглядной, так как состоит из отдельных нодов и связей между ними, подобно блок-схеме. Рассмотрим более подробно каждый этап моделирования.

На **первом этапе** следует преобразовать содержимое shapfile в объекты программы Rhinoceros. Стандартные инструменты не позволяют выполнить такую конвертацию, поэтому используется дополнительный пакет Gismo для Grasshopper, который позволяет автоматически генерировать геометрию городской застройки и территорию, свободную от нее (дороги, парки, водоемы и т. д.). Максимальный радиус моделируемой территории равен 27 км, но зависит от широты места, причем на севере он меньше, чем на юге. Так, для Новосибирска радиус области моделирования не превышает 16 км. Учитывая, что размер Новосибирска составляет 27×45 км, таких областей потребуется как минимум две с последующим удалением дубликатов контуров зданий на их пересечении. Также следует отметить, что пакет Gismo был создан в 2019 г. и с тех пор не обновлялся, а в OSM с 2023 г. появился дополнительный тег `map_made`, позволяющий идентифицировать различные сооружения, такие как цистерны, шахты, насосные станции, антенны и т. п. По этим причинам Gismo используется в проекте только для конвертации shapfile и для трансформации географических координат в прямоугольные и обратно. В частности, используется нод «Gismo_Read SHP», который разделяет содержимое shapfile на линии (контур здания) и соответствующие им ключи (теги OSM) со значениями (рис. 1). Некоторые здания состоят из нескольких замкнутых контуров, например, типичные для центра Санкт-Петербурга дома с дворами-колодцами. Для минимизации количества объектов (точка, линия, поверхность) с помощью стандартных нодов Grasshopper контуры зданий преобразуются в поверхности (Surface). В результате одному зданию или части здания (крыло, корпус, пристройка) соответствует один элемент модели – поверхность и свой набор атрибутов (пар ключей и значений). К примеру, модель городской застройки Новосибирска состоит из 77918 элементов (зданий, сооружений, и прочих объектов) и 18 атрибутов в каждом.

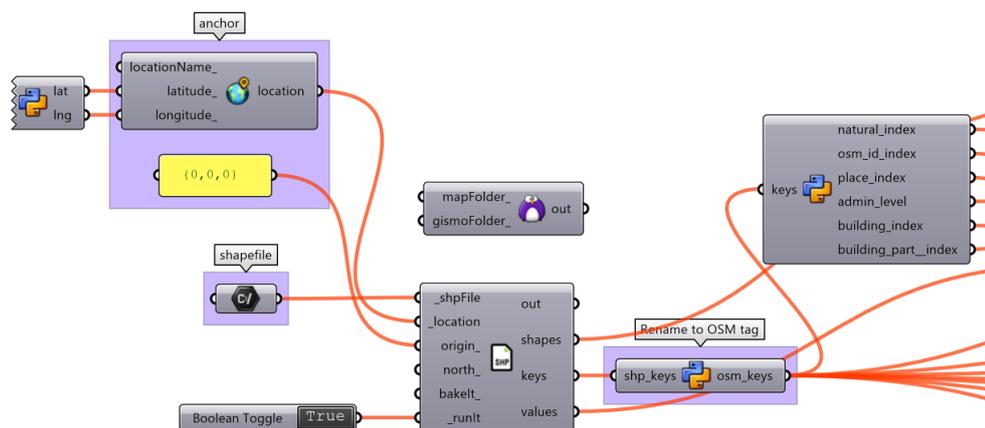


Рис. 1. Часть скрипта Grasshopper, преобразующего shapefile в объекты Rhinoceros
 Fig. 1. Part of the Grasshopper script converting shapefiles to Rhinoceros objects

На **втором этапе** из модели удаляются все здания, не излучающие тепло. Определить такие здания можно по типу и по площади. Проверить тип можно по значению тега «building», «building:part» и с 2023 г. по дополнительному тегу «man_made». Список с такими типами зданий, к которым относятся гаражи, стоянки, водонапорные башни, цистерны, элеваторы, и т. п., хранится в отдельном файле и при необходимости дополняется. Также предполагается, что здания с площадью меньше 20 кв. метров либо являются вспомогательными и не отапливаются, либо дают незначительный вклад в общий поток тепла, поэтому тоже удаляются из расчетной модели. Отдельный скрипт Python проверяет площадь и тип здания и при обнаружении зданий, не генерирующих тепло, автоматически удаляет их из модели. Для этого при анализе различных городов РФ создан файл, содержащий коллекцию всех типов зданий, в частности, не излучающих тепло. Если в модели присутствует здание, тип которого присутствует в коллекции и относится к типу зданий, не излучающих тепло, то оно исключается.

В результате такой фильтрации из модели городской застройки Новосибирска было удалено 5460 элементов, из них 5146 зданий и сооружений, а остальные части здания – лифтовые шахты, подъезды, колонны, брандмауэры и т. п.

При реализации проекта предусмотрен дополнительный **третий этап** – пополнение данных из сайта «Народная карта» для зданий, высота или этажность у которых отсутствует. Для каждого здания, высота которого не указана в OSM, следует сгенерировать адрес ресурса на сайте «Народная карта», соответствующий этому зданию, который имеет вид:

«<https://n.maps.yandex.ru/#!//?z=N&ll=Long%2CLat&l=nk%23map>»,

где N – уровень масштабирования карты от 1 до 22 (выбирается максимальным, равный 22); $Long$ и Lat – географические координаты центра карты, которыми являются долгота и широта центра здания из OSM.

В результате использования такого ресурса удалось уточнить высоту для 39734 зданий Новосибирска и остается неизвестна высота для 10195 (14,1%) зданий. В отличие от [8–10] поиск информации о высоте остальных зданий Новосибирска осуществляется на сервере ГИС ЖКХ⁶. Для этого используются адреса зданий из OSM (теги `addr:street` и `addr:housenumber`), а также файл реестра объектов жилищного фонда ГИС ЖКХ с адресами зданий и их ГУИД

⁶ <https://dom.gosuslugi.ru/homemanagement/api/rest/services/houses/public/>

(рис. 2). По адресу из OSM находится соответствующая запись с адресом в реестре, по которому определяется ГУИД.

```
Адрес ОЖФ|Идентификационный код адреса дома в ГИС ЖКХ|Глобальный уникальный идентификатор дома по ФИАС|Код
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, пер. Обские зори, д. 21||00bf5b28-32ec-4ca3-bf6d-854dccb0d49|5
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, пер. Обские зори, д. 22||09a85b9d-3b0a-4cd7-9d82-853b3e2445d8|5
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, пер. Обские зори, д. 40||f0edeefe-4982-414e-8963-99140cc6cfa7|5
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, ул. 1-я Сухарная, д. 10||c96f4684-9698-4359-aca1-5f3c50708ae7|5
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, ул. 1-я Сухарная, д. 101||24a95ae9-0371-4911-b123-ec6b7a5a41c7|
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, ул. 1-я Сухарная, д. 103||69292a7a-3365-4ead-8d05-de0af1260e25|
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, ул. 1-я Сухарная, д. 107||1cec3f7b-175f-4fd8-b740-c19d104aa71a|
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, ул. 1-я Сухарная, д. 109||636850e5-1c75-41e7-b462-443b0383f655|
630001, Новосибирская обл, г. Новосибирск, ул. 1-я Сухарная, д. 113||20a9268d-6bf3-4045-b9a8-34a9a188c556|
```

Рис. 2. Пример записи в реестре объектов жилищного фонда ГИС ЖКХ

Fig. 2. Example of a record in the housing stock register of the State Information System of Housing and Communal Services

Отметим, что адреса в ГИС ЖКХ и OSM могут незначительно различаться (порядок слов, регистр, сокращения), поэтому сравнивать их нужно не строго. В проекте для этого используется библиотека FuzzyWuzzy в Python, основанная на метрике Левенштейна, измеряющая по модулю разность между двумя последовательностями символов [11]. Допустимой выбрана оценка выше 98 и заранее добавлены известные замены, например ул. – улица, пер. – переулок и т. д. Так, для Новосибирска удалось получить ГУИД для 4269 зданий без высоты, но с адресами. Для таких зданий с сервера ГИС ЖКХ было получено 3862 записи с информацией о количестве этажей.

После такой коррекции из 72 458 зданий, излучающих тепло, остается 6333 (8,7 %) здания без информации о высоте, таким зданиям присваивается минимально допустимое значение, равное 3 м (предполагается, что здания меньшей высоты не существуют).

На **четвертом этапе** устраняются коллизии (пересечения) контуров зданий. В OSM, в некоторых случаях, хранится два типа контуров зданий: здание целиком и его части (соответствующие теги: building и building:part), которые могут пересекаться (рис. 3, а, б).

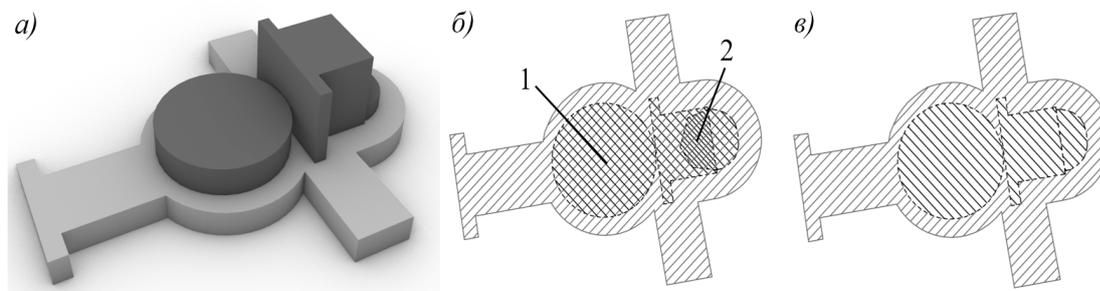


Рис. 3. Здание и его части: а – 3D-вид; б – вид сверху до устранения пересечений (1 – пересечение здания и его части; 2 – пересечение двух частей здания); в – вид сверху после устранения пересечений

Fig. 3. The building and its parts: а – 3D view; б – top view before eliminating intersections (1 – intersection of the building and its part; 2 – intersection of two parts of the building); в – top view after eliminating intersections

Для устранения таких коллизий требуется учитывать высоту пересекающихся частей зданий, поэтому для дальнейшего корректного расчета АПТ отсекается часть контура того элемента, у которого высота ниже (рис. 3, в).

Для обнаружения коллизий можно применить как минимум два подхода. Самый простой способ заключается в том, что на начальной итерации проверяется пересечение первого кон-

тура здания со всеми остальными, т. е. $N-1$ контуров, где N – количество обрабатываемых контуров. На следующем шаге необходимо проверить пересечение второго контура с оставшимися $N-2$ контурами и т. д. В этом случае скорость обработки будет пропорциональна сумме арифметической прогрессии.

Второй способ позволяет оптимизировать процесс поиска коллизий, что возможно, если проверять на пересечение только контуры, ближайšie к рассматриваемому зданию. Решить такую задачу позволяет упорядочение данных при помощи R-дерева, являющегося древовидной структурой данных для организации доступа к пространственно расположенным объектам [12]. Представление информации о координатах центров контуров зданий в виде R-дерева позволяет быстро найти все здания при заданном радиусе поиска. При этом предполагается, что не существует зданий длиной больше 1 км, поэтому в алгоритме используется поиск с радиусом 500 м. Количество зданий в такой области поиска не превышает 1000 и скорость обработки в худшем случае составит $N \cdot 1000$ итераций. Такой подход увеличивает скорость поиска коллизий контуров зданий в Москве более чем в 122 раза, в Санкт-Петербурге – в 73, в Новосибирске – в 36 раз по сравнению с первым алгоритмом.

На **пятом этапе** каждому объекту добавляется тег «heat», значение которого – «удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию», учитывающая высоту и тип здания, согласно таблице 14 СП 50.13330.2012 [13]. Также в общие данные заносится информация о коэффициентах теплопередачи ограждающих конструкций (см. табл. 3 СП 50.13330.2012), соответствующая климатическим условиям города.

На **шестом этапе** задается расчетная сетка размером 30×30 м. Если здание попадает на несколько расчетных ячеек, то его контур разбивается на части, попадающие в ту или иную ячейку. Так как расчет внутри каждой ячейки не зависит от соседних, то в алгоритм можно включить распараллеливание, что в разы ускоряет получение результата на современных многоядерных процессорах.

В результате получаются данные, где каждая строка записи хранит информацию об отдельной непустой ячейке, содержащей координаты ее центра, суммарную площадь наружных стен и крыш, внутренний объем и среднюю высоту зданий, а также значения АПТ по 1-му и 2-му алгоритму (см. [6–8; 14]).

Результаты

В настоящее время с помощью представленного комплекса скриптов построены детальные модели 37 городов России с населением более 500 тысяч человек [10]. В отличие от [10] в данной работе модель Новосибирска дополнена информацией из ГИС ЖКХ. Для визуальной оценки качества построенной модели городской застройки плоские контуры зданий преобразованы в трехмерные объекты, что показывает согласованность модели с реальными зданиями города (рис. 4).

Рассматривается Новосибирск в рамках административных границ и его урбанизированная территория – городская застройка со зданиями высотой не менее двух этажей, точнее, не ниже 6 м. Площадь урбанизированной территории определяется суммарной площадью ячеек сетки, содержащих часть хотя бы одного здания с высотой не менее двух этажей. Это связано с тем, что городская застройка занимает лишь незначительную часть площади административной территории, а поэтому рассматривать пространственное распределение плотности АПТ в административных границах не имеет смысла, так как основная часть территории будет генерировать поток менее 5 Вт/м^2 . Например, доля крыш зданий на административной территории Новосибирска занимает всего 6,7 %, а на урбанизированной территории без учета и с учетом данных ГИС ЖКХ – 29,9 и 29,8 %, соответственно. В табл. 1 приведены геометрические характеристики городской застройки Новосибирска. Также для сравнения в табл. 1–2 приводятся данные для Москвы и Санкт-Петербурга.



Рис. 4. Вид на Красный проспект со стороны ул. Державина в Новосибирске, фотография (панорама Яндекс Карт) сверху и трехмерная модель снизу
 Fig. 4. View of Krasny Avenue from Derzhavin Street in Novosibirsk, photo (Yandex Maps panorama) above and 3D model below

Таблица 1

Геометрические характеристики городской застройки

Table 1

Geometric characteristics of urban development

Город	Высота, м		Объем зданий, 10^9 м^3	Площадь стен, 10^6 м^2	Площадь крыш, 10^6 м^2	Площадь территории, 10^6 м^2	Доля крыш в общей площади, %
	Среднее	Медиана					
Административная территория							
Москва	11,0	6,0	2,166	325,8	141,4	2558,1	5,5
Санкт-Петербург	10,2	6,0	1,284	183,3	95,07	1451,4	6,6
Новосибирск	6,3	3,0	0,375	55,80	33,86	502,54	6,7
Новосибирск*	6,4	3,0	0,378	56,41	33,86	502,54	6,7
Урбанизированная территория							
Москва	23,4	15,0	1,935	283,0	91,21	307,3	29,7
Санкт-Петербург	19,3	15,0	1,144	158,4	65,08	200,2	32,5
Новосибирск	19,9	15,0	0,298	41,12	16,45	54,99	29,9
Новосибирск*	19,8	15,0	0,301	41,70	16,60	55,76	29,8

*Новосибирск с информацией о высоте зданий из ГИС ЖКХ.

В табл. 2 приведено распределение зданий по высоте. Видно, что после уточнения данных по высоте зданий из ГИС ЖКХ скорректировано количество зданий высотой до 9 м включительно.

Таблица 2

Распределение зданий по высоте

Table 2

Distribution of buildings by height

Город	Доля зданий разной высоты (в метрах), %									Всего зданий, шт.
	высота неиз-вестна	(0–3]	(3–6]	(6–9]	(9–12]	(12–15]	(15–30]	(30–45]	> 45	
Москва	17	32	22	8	3	6	6	4	4	244 187
Санкт-Петербург	20	30	18	9	5	6	7	2	2	146 921
Новосибирск	14	49	20	4	2	4	4	1	1	72 458
Новосибирск*	9	53	21	5	2	4	4	1	1	

*То же что в табл. 1

В табл. 3 для административной и урбанизированной территории приведены плотность АПТ ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и плотность антропогенной энергии ($10^6 \text{ Дж}/(\text{сут}\cdot\text{м}^2)$), выделяемой за сутки, а также энергия, генерируемая за сутки ($10^{12} \text{ Дж}/\text{сут}$) и за отопительный период (10^{15} Дж), при температуре наружного воздуха $t_{\text{НАР}}$ равной средней температуре отопительного периода $t_{\text{ОТ}} = -7,9 \text{ }^\circ\text{C}$, по первому и второму алгоритмам в Новосибирске. Для сравнения среднее значение АПТ по Москве составляет порядка $55,9 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [15]. По оценкам, полученным по модели COSMO-CLM, АПТ в разных районах Москвы находится в интервале $27\text{--}75 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [16].

Таблица 3

Для административной и урбанизированной территории плотность АПТ и антропогенной энергии, а также энергия, выделяемая за сутки и за отопительный период, при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$, по первому и второму алгоритмам в Новосибирске

Table 3

For administrative and urban areas, the density of AHF and anthropogenic energy, as well as the energy released per day and during the heating period, at $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$, according to the first and second algorithms in Novosibirsk

Административные границы		Урбанизированная территория	
Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 1	Алгоритм 2
Плотность АПТ ($\text{Вт}/\text{м}^2$)			
3,08	7,34	18,3	51,7
3,10*	7,43*	18,6*	52,5*
Плотность антропогенной энергии ($10^6 \text{ Дж}/(\text{сут}\cdot\text{м}^2)$)			
0,266	0,634	1,58	4,46
0,268*	0,642*	1,60*	4,54*
Энергия ($10^{12} \text{ Дж}/\text{сут}$), выделяемая за сутки			
4,79	11,4	3,12	8,80
4,83*	11,6*	3,16*	8,94*
Энергия (10^{15} Дж), выделяемая за отопительный период			
29,7	70,7	19,3	54,5
29,9*	71,6*	19,6*	55,4*

*То же что в табл. 1

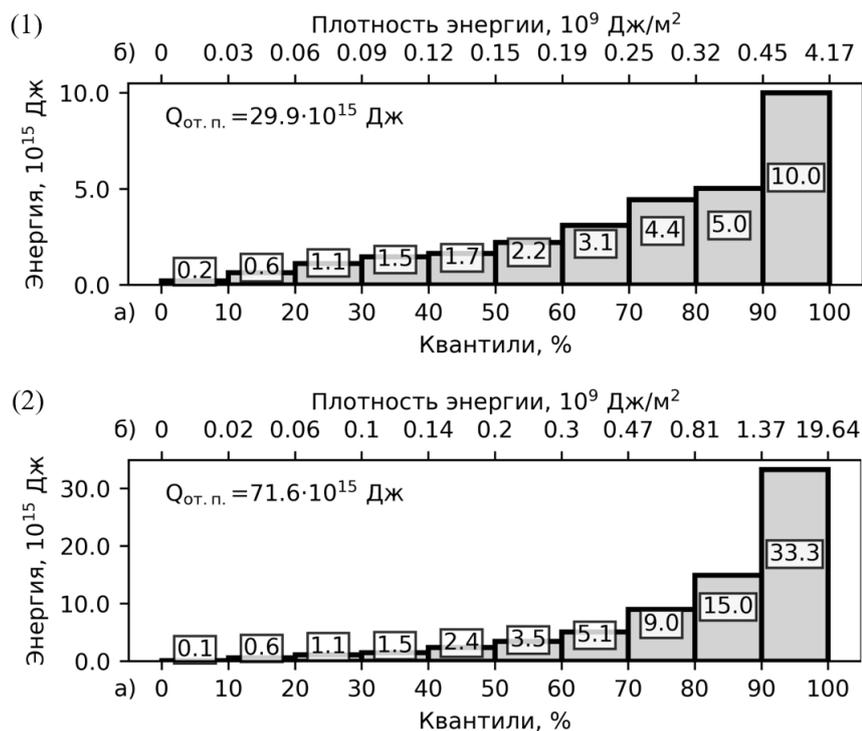


Рис. 5. Гистограммы распределений антропогенной энергии, ПДж, выделяемой за отопительный период зданиями с территории Новосибирска, рассчитанные по первому (1) и второму (2) алгоритмам:

a – уровень квантили; b – распределение плотности антропогенной энергии, ГДж/м²

Fig. 5. Histograms of anthropogenic energy distributions, PJ, released during the heating period by buildings from the territory of Novosibirsk, calculated using the first (1) and second (2) algorithms:

a – quantile level; b – anthropogenic energy density distribution, GJ/m²

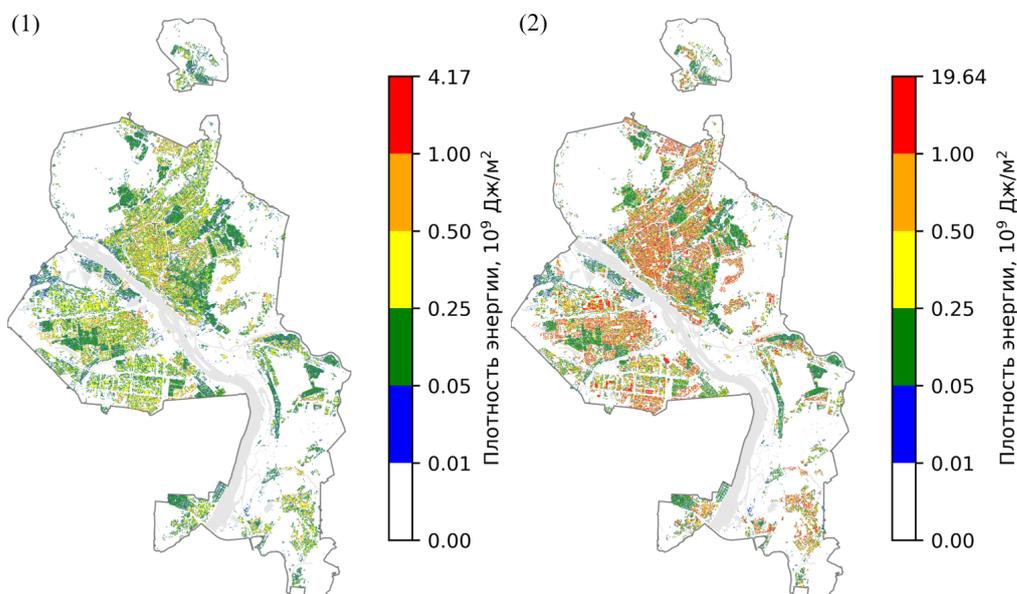


Рис. 6. Карты распределения плотности антропогенной энергии, ГДж/м², выделяемой за отопительный период зданиями с территории Новосибирска, рассчитанные по первому (1) и второму (2) алгоритмам

Fig. 6. Maps of anthropogenic energy density distribution, GJ/m², released during the heating period by buildings on the territory of Novosibirsk, calculated using the first (1) and second (2) algorithms

На рис. 5 представлены гистограммы распределения антропогенной энергии, выделяемой зданиями Новосибирска за отопительный период, рассчитанные по первому и второму алгоритму. Видно, что медиана (уровень квантили – 50 %) соответствует плотности энергии в 0,15 и 0,2 ГДж/м² для первого и второго алгоритма. Распределение АПТ за отопительный период неравномерно: 10 % городской территории со зданиями может генерировать 0,2–10 ПДж тепловой энергии по результатам первого алгоритма и 0,1–33,3 ПДж по результатам второго. Пиковые значения плотности энергии составляют 4,17 и 19,64 ГДж/м² для первого и второго алгоритма соответственно. На рис. 6 показана тепловая карта, позволяющая визуальнo оценить распределения плотности антропогенной энергии, выделяемой за отопительный период зданиями с территории Новосибирска, рассчитанные по двум алгоритмам. Рис. 6 позволяет определить районы с максимальным уровнем АПТ и показать, какие районы нуждаются в проведении мероприятий, позволяющих уменьшить тепловое загрязнение городской окружающей среды.

Заключение

Детально описано создание геометрической модели городской застройки, позволяющее оценить порядок АПТ на основе данных из открытых источников. Отличительной особенностью данного исследования стало использование, помимо данных из OSM и Яндекс Карт, информации из ГИС ЖКХ, что уточнило модель городской застройки, сократив количество зданий с неизвестной высотой. Описанный метод расчета АПТ имеет высокое пространственное разрешение благодаря расчетной сетке 30 × 30 м.

Результаты, полученные с помощью представленного комплекса скриптов, применимы к любой городской агломерации, полезны при планировании и управлении энергопотреблением городского хозяйства [17], а также могут использоваться в качестве входных параметров в региональных прогностических и климатических моделях.

К недостатку алгоритмов расчета АПТ можно отнести предположение, что все здания соответствуют требуемым теплофизическим характеристикам, в действительности это не всегда так. Однако в крупных городах России ведется активная работа по присвоению классов энергоэффективности зданиям⁷, что позволит в рамках 2-го алгоритма улучшить оценку АПТ.

Список литературы

1. **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. Vol. 18(23). P. 17573–17587. DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018
2. **Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M.** Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment // *Atmosphere.* 2020. Vol. 11(12).
3. **Hidalgo J., Masson V., Baklanov A., Pigeon G. and Gimeno L.** Advances in Urban Climate Modeling // *Annals of the New York Academy of Sciences.* 2008. Vol. 1146(1). P. 354–374. DOI: 10.1196/annals.1446.015
4. **Chen W., Zhou Y., Xie Y., Chen G., Ding K. J., & Li D.** Estimating spatial and temporal patterns of urban building anthropogenic heat using a bottom-up city building heat emission model // *Resources, Conservation and Recycling.* 2022. Vol. 177. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105996
5. **Jin LX., 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. Vol. 178(2). P. 249–281. DOI: 10.1007/s10546-020-00569-y
6. **Фролькис В. А., Гинзбург А. С., Евсиков И. А.** Оценка антропогенного потока тепла, создающего городской покрывающий слой, на основе «OpenStreetMap» // *Атмосферная*

⁷ <https://www.mos.ru/news/item/114275073/>

- радиация и динамика (МСАРД–2021): Сб. тр. Международ. симпозиума, СПб., 29 июня – 02 июля 2021 года. СПб.: ВВМ, 2021. С. 128–134.
7. **Фролькис В. А., Евсиков И. А., Мовсесова Л. В., Мотылев А. Д.** Моделирование антропогенного потока тепла и острова тепла в мегаполисах России // Атмосферная радиация и динамика (МСАРД–2023): Сб. тр. Международ. симпозиума, СПб., 21–24 июня 2023 года. СПб.: ВВМ, 2023. С. 197–201.
 8. **Гинзбург А. С., Евсиков И. А., Фролькис В. А.** Зависимость антропогенного потока тепла от температуры воздуха (на примере Санкт-Петербурга) // Известия РАН. Сер.: Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 5. С. 526–538. DOI: 10.31857/S0002351521050060
 9. **Фролькис В. А., Евсиков И. А., Гинзбург А. С.** Моделирование антропогенного потока тепла в течение отопительного периода в крупных городах России // Известия РАН. Сер.: Физика атмосферы и океана. 2024. (в печати)
 10. **Фролькис В. А., Евсиков И. А.** Оценка антропогенного потока тепла в течение отопительного периода в городах Российской Федерации с населением не менее полумиллиона человек // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2024. (в печати)
 11. **Левенштейн В. И.** Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Докл. АН СССР. 1965. Т. 163 (4). С. 845–848.
 12. **Guttman A.** R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching // ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM. 1984. Vol. 14. P. 47–57.
 13. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М.: Минрегион России, 2012. 96 с.
 14. **Фролькис В. А., Евсиков И. А.** Расчет антропогенного потока тепла за период отопительного сезона в мегаполисе (на примере Санкт-Петербурга) // ENVIROMIS 2022. Томск: Томский центр научно-технической информации, 2022. С. 395–398.
 15. **Гинзбург А. С., Белова И. Н., Расплетина Н. В.** Антропогенные потоки тепла в городских агломерациях // ДАН. 2011. Т. 439, № 2. С. 256–259.
 16. **Гинзбург А. С., Докукин С. А.** Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 1. С. 53–66. DOI 10.31857/S0002351521010053
 17. **Гинзбург А. С., Решетарь О. А., Белова И. Н.** Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 20–27. DOI: 10.1134/S0040363616080063

References

1. **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, vol. 18(23), pp. 17573–17587. DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018.
2. **Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M.** Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment. *Atmosphere*, 2020, vol. 11(12).
3. **Hidalgo J., Masson V., Baklanov A., Pigeon G. and Gimeno, L.** Advances in Urban Climate Modeling. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, Vol. 1146(1), pp. 354–374. DOI:10.1196/annals.1446.015.
4. **Chen W., Zhou Y., Xie Y., Chen G., Ding K. J., & Li, D.** Estimating spatial and temporal patterns of urban building anthropogenic heat using a bottom-up city building heat emission model. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 177. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105996.
5. **Jin LX., 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, vol. 178(2), pp. 249–281. DOI: 10.1007/s10546-020-00569-y.
6. **Frolkis V. A., Ginsburg A. S., Evsikov I. A.** Estimation of anthropogenic heat fluxes creating the urban canopy based on “OpenStreetMap”. *International Symposium “Atmospheric Radiation*

- and Dynamics*”: *Proceedings of the International Symposium*, St. Petersburg, June 29 – July 2, 2021. St. Petersburg, 2021, pp. 128–134. (in Russ.)
7. **Frolkis V. A., Evsikov I. A., Movsesova L. V., Motylev A. D.** Modeling anthropogenic heat fluxes and heat islands in Russian megacities. *Atmospheric Radiation and Dynamics: Proceedings of the International Symposium*, St. Petersburg, June 21–24, 2023. St. Petersburg., 2023, pp. 197–201. (in Russ.)
 8. **Ginsburg A. S., Evsikov I. A., Frolkis V. A.** Dependence of the anthropogenic heat flux on air temperature (using St. Petersburg as an example). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 461–471. DOI: 10.1134/S0001433821050066
 9. **Frolkis V. A., Evsikov I. A., Ginsburg A. S.** Modeling of anthropogenic heat fluxes during the heating season in major cities of Russia. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2024. In print. (in Russ.)
 10. **Frolkis V. A., Evsikov I. A.** Estimation of anthropogenic heat fluxes during the heating season in cities of the Russian Federation with a population of at least half a million people. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov*, 2024. In print. (in Russ.)
 11. **Levenshtein V. I.** Binary codes with correction of deletions, insertions, and substitutions. *Rep. Acad. Sci. USSR*, 1965, vol. 163 (4), pp. 845–848. (in Russ.)
 12. **Guttman A.** R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching. *ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM*, 1984, vol. 14, pp. 47–57.
 13. SP 50.13330.2012 “Thermal Protection of Buildings.” Updated edition of SNiP 23-02-2003. Ministry of Regional Development of Russia. 2012, 96 p. (in Russ.)
 14. **Frolkis V. A., Evsikov I. A.** Calculation of anthropogenic heat flux during the heating season in a metropolis (using St. Petersburg as an example). *ENVIROMIS 2022*. Tomsk, 2022, pp. 395–398. (in Russ.)
 15. **Ginsburg A. S., Belova I. N., Raspeltina N. V.** Anthropogenic heat fluxes in urban agglomerations. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 439, no. 2, pp. 256–259. (in Russ.)
 16. **Ginsburg A. S., Dokukin S. A.** Influence of thermal air pollution on the urban climate (estimates using the COSMO-CLM model). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 47–59. DOI: 10.1134/S0001433821010059
 17. **Ginsburg A. S., Reshetar O. A., Belova I. N.** Influence of climatic factors on energy consumption during the heating season. *Thermal Engineering*, 2016, no. 9, pp. 20–27. DOI: 10.1134/S0040363616080063. (in Russ.)

Сведения об авторах

Евсиков Игорь Александрович, старший преподаватель кафедры информатики Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета; сотрудник Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова

Information about the Authors

Igor A. Evsikov, Senior Lecturer, Department of Computer Science, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 12.12.2023;
одобрена после рецензирования 08.05.2024; принята к публикации 08.05.2024*

*The article was submitted 12.12.2023;
approved after reviewing 08.05.2024; accepted for publication 08.05.2024*