

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-123-146>

УДК 551.584.61:551.588.7;697.1

**Антропогенный поток тепла, выделяемый в атмосферу и почву в течение отопительного периода зданиями северных городов РФ**В.А. Фролькис^{1,2,3✉}, И.А. Евсиков^{1,3}¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия✉ vfrolkis@voeikovmgo.ru

ID ВАФ, 0000-0002-0302-2083; ИАЕ; 0000-0003-4793-2975

Аннотация. Представлены оценки доли антропогенного потока тепла, обусловленные отоплением, при предположении, что он зависит от температуры наружного воздуха, а здания удовлетворяют теплофизическим нормам, приведенным в строительных правилах. На основе веб-картографической платформы OpenStreetMap, сервиса Яндекс Карты и ГИС ЖКХ построены модели застройки 12 городов и поселений, расположенных на севере России. Рассчитаны объемы и площади ограждающих конструкций всех зданий. Рассмотрены три различных алгоритма вычисления антропогенного потока тепла. Первый алгоритм использует понятие нормируемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций; второй основан на нормируемом значении удельной теплозащитной характеристики здания; третий использует нормируемую удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Предлагается использовать усредненную оценку антропогенного потока тепла, полученную по всем алгоритмам. Антропогенный поток тепла определяли с административной и урбанизированной территории. Приведены оценки выделяемой за отопительный период антропогенной энергии с административной и урбанизированной территорий. С административной территории генерируемое количество тепла находится в интервале (в ПДж) для Сургута 8,29–20,7; Якутска 9,57–23,6; Архангельска 7,37–15,4; Мурманска — 5,16–11,6; Норильска — 2,99–9,09; Воркуты, Апатитов и Салехарда — 1,29–4,80; Нарьян-Мара — 0,961–1,92; Дудинки — 0,537–1,42; Тикси и Диксона — 0,247–0,681. Плотность потока тепла в направлении к подстилающей поверхности от нижней границы зданий в среднем в течение отопительного периода находится в интервале 1,20–1,96 Вт/м². Приведены значения антропогенной энергии, усредненные за отопительные периоды 2013–2018 и 2018–2023 гг.

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Ключевые слова: антропогенный поток тепла, антропогенный поток тепла к подстилающей поверхности, карты распределения антропогенного потока тепла, административная территория, урбанизированная территория, городской остров тепла

Для цитирования: Фролькис В.А., Евсиков И.А. Антропогенный поток тепла, выделяемый в атмосферу и почву в течение отопительного периода зданиями северных городов РФ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):123–146. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-123-146>

Поступила 16.03.2025

После переработки 12.05.2025

Принята 09.06.2025

Anthropogenic heat flux into the atmosphere and soil created by settlements located in the north of Russia

Victor A. Frolkis^{1,2,3✉}, Igor A. Evsikov^{1,3}

¹ *Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg, Russia*

² *Saint Petersburg State Economic University, St. Petersburg, Russia*

³ *Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia*

✉ vfrolkis@voeikovmgo.ru

ID VAF, 0000-0002-0302-2083; IAE; 0000-0003-4793-2975

Abstract. Estimates are presented for the share of anthropogenic heat flux caused by heating, based on assuming that anthropogenic heat flux depends on outdoor air temperature and that buildings comply with the thermophysical standards specified in the construction regulations. Using the OpenStreetMap web mapping platform, the Yandex Maps service, and GIS housing and communal services, building models were constructed of 12 cities and settlements located in northern Russia. The volumes of all buildings and the surface areas of their enclosing structures were calculated. Three algorithms for estimating the anthropogenic heat flux are considered. The first algorithm uses the concept of normative heat transfer resistance of enclosing structures. The second is based on the normalized value of the specific heat protection characteristic of a building. The third uses the normalized specific characteristic of heat energy consumption for heating and ventilation of the building. It is proposed to use the average anthropogenic heat flux estimate obtained by all algorithms. anthropogenic heat flux is estimated from an administrative and urbanized area. During the heating period the anthropogenic heat flux density from the urbanized area per 1°C difference between indoor and outdoor air temperatures ranges from 0.31 to 1.75 W/(m²·°C). The anthropogenic heat flux density from the urbanized area for the average heating period temperature is located within the range where the lower boundary is estimated between 9.60 and 19.5 W/m², and the upper boundary between 30.0 and 61.2 W/m², depending on the settlement. In this case the total emitted anthropogenic energy (in PJ) from the administrative area is equal to 8.29–20.7 for Surgut; for Yakutsk 9.57–23.6; Arkhangelsk 7.37–15.4; Murmansk — 5.16–11.6; Norilsk — 2.99–9.09; Vorkuta, Apatite and Salekhard — 1.29–4.80; Naryan-Mar — 0.961–1.92; Dudinka — 0.537–1.42; Tiksi and Dixon's — 0.247–0.681. The anthropogenic heat flux density directed downward toward the underlying surface during the heating season is in the range of 1.20–1.96 W/m². Values of anthropogenic energy averaged over the heating periods 2013–2018 and 2018–2023 are given. Maps of the spatial distribution of the anthropogenic heat flux density for Vorkuta and Apatite are presented.

Keywords: anthropogenic heat flux, anthropogenic heat flux to the underlying surface, heating period, anthropogenic heat flux distribution maps, administrative territory, urbanized territory, urban heat island

For citation: Frolkis V.A., Evsikov I.A. Anthropogenic heat flux into the atmosphere and soil created by settlements located in the north of Russia. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):123–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-123-146>

Received 16.03.2025

Revised 12.05.2025

Accepted 09.06.2025

Введение

Около двух третей территории Российской Федерации относится к зоне многолетней мерзлоты. В конце 60-х — начале 70-х гг. XX в. М.И. Будыко предположил, что в результате антропогенного загрязнения атмосферы начнется повышение приземной температуры воздуха, причем максимальное потепление будет наблюдаться в высоких широтах [1]. В ежегодном отчете NOAA указывается, что 11-й год подряд в Арктике наблюдается более сильное повышение температуры, чем на остальных территориях [2]. Такое изменение арктического климата может приводить к таянию вечной мерзлоты, что повлечет за собой значительные отрицательные последствия для экономики и жителей северных широт.

Выделяемая в атмосферу часть потребляемой энергии, называемая антропогенным потоком тепла (АПТ), состоит из потоков тепла от зданий, транспорта и метаболизма живых организмов [3]. В течение отопительного периода АПТ от городской застройки составляет от 89 до 96 % [3], причем он достигает максимального значения на урбанизированной территории, характеризующейся наиболее плотной застройкой и не превышающей 10 % от административной территории города. АПТ в жилых и промышленных районах является одним из основных факторов процесса таяния вечной мерзлоты в холодное время года. Летом этот процесс обусловлен наблюдаемым потеплением в северных широтах, на которое накладывается поток тепла от зданий, обусловленный нагревом инсоляцией непроницаемых материалов с большой тепловой инерцией с последующей их теплоотдачей [4].

Интенсивность острова тепла, обусловленного АПТ в холодный период, зависит от физико-географического положения города и численности его населения, от структуры промышленных предприятий и т. п. Для городов, расположенных в высоких широтах и примыкающих к ним умеренных широтах, количество выделяемого антропогенного тепла в декабре и январе может быть соизмеримо или даже больше количества поглощенной солнечной радиации. Так, в случае безоблачного неба согласно СП 131.13330.2020¹ на широтах 60, 64 и 68° с. ш. суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная) на горизонтальную поверхность составляет: за ноябрь 97, 56, 14; за декабрь 39, 0 и 0 и за январь 70, 29 и 0 МДж/м². Среднемесячные оценки АПТ (в МДж/м²), рассчитанные за отопительный период по среднесуточным температурам в течение 2013–2023 гг. для урбанизированной территории населенных пунктов России, расположенных на широтах 61–62° с. ш. (например, Сургут и Якутск), 64,5–66,5° с. ш. (Архангельск и Салехард), 67,5–67,6 (Воркута, Апатиты и Нарьян-Мар) и 68,5–69,5° с. ш. (Мурманск и Норильск), находятся соответственно в интервалах: в ноябре 1,58–5,28, 1,07–3,41, 1,14–2,99 и 1,25–5,79; в декабре 1,82–6,71, 1,35–3,95, 1,27–3,41 и 1,44–6,85; в январе 2,00–6,82, 1,46–4,28, 1,35–4,88 и 1,60–7,14. Приведенные значения АПТ указывают на важность его оценки в населенных пунктах северных широт.

АПТ может влиять на структуру и свойства городского атмосферного приземного слоя, так как, с одной стороны, повышение температуры, особенно в плотно застроенных районах, может создавать более интенсивную конвекцию и тем самым влиять на погоду, с другой стороны, в районах с интенсивной застройкой шероховатость поверхности возрастает, а это приводит к торможению воздушного потока в ре-

¹ СП 131.13330.2020 (СНИП 23-01-99*). Свод правил. Строительная климатология. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 09.03.2025).

зультате поверхностного трения и замедлению обмена тепловой энергией с атмосферой [5]. Воздействие АПТ на приземный слой атмосферы во многом определяется тем, как этот поток тепла распределяется между компонентами теплового баланса поверхности. Часть АПТ обусловлена теплопередачей из помещений в атмосферу через стены и крыши зданий и вентиляцию, а другая часть тепла направлена вниз к подстилающей поверхности из-за потока через нижнюю границу здания, к которому добавляются тепловые стоки от работы систем канализации и водоснабжения.

АПТ, обусловленный энергией, используемой для отопления, зависит от температуры наружного воздуха. Эта зависимость приводит к появлению отрицательной обратной связи между температурой воздуха и АПТ, поскольку понижение температуры атмосферного воздуха увеличивает энергопотребление и АПТ, а увеличение АПТ приводит к росту температуры приземного воздуха [6]. Наиболее существенное влияние АПТ достигается при малой инсоляции или при полном ее отсутствии, в этом случае возможно подавление вертикального перемешивания при переходе к устойчивой стратификации и, в частности, уменьшение толщины атмосферного перемешанного слоя. С другой стороны, интенсивный АПТ может приводить к увеличению толщины перемешанного слоя за счет конвекции и даже к полному исчезновению ночной приземной инверсии [6].

Оценка АПТ может быть получена различными способами, например, инвентаризацией (суммирование потребляемой энергии), дистанционными спутниковыми измерениями и прямыми измерениями [7–10]. Также помимо измерений используется численное моделирование АПТ [11]. Так, региональная климатическая модель COSMO-CLM с разрешением 1 км, в которой учитывается энергопотребление зданий при помощи параметризации DCEP, является методом оценки «сверху вниз» [12].

На основе геоинформационных технологий и информационного моделирования зданий появился метод оценки АПТ, который можно назвать «снизу вверх». В рамках такого подхода АПТ вычисляется для каждого здания, а полный городской поток тепла получается суммированием по всем зданиям [13, 14]. Для г. Бостона (США) описан, по сути, близкий подход к оценке АПТ [15], но использующий другую технологию: рассматриваются некоторые здания, для которых с течением времени известно поведение их энергетического баланса (параметризация ВЕР + ВЕМ), что позволяет вычислить АПТ от этих зданий; предполагается, что однотипные здания генерируют со временем такой же поток тепла; все здания города распределяются по однотипным группам с последующим суммированием АПТ. К сожалению, такой метод оценки не может иметь широкого применения, это связано с отсутствием необходимых измерений теплофизических характеристик зданий, требующих больших финансовых затрат, и возможности использования соответствующей математической модели.

В данной работе применяется альтернативный способ оценивания АПТ по схеме «снизу вверх», когда АПТ вычисляется для каждого здания на основе действующих строительных норм по теплоизоляции зданий и их энергопотреблению СП 50.13330.2012², СП 131.13330.2020 и ГОСТ 30494-2011³, а полный АПТ полу-

² СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 09.03.2025).

³ ГОСТ 30494-2011. Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053> (дата обращения: 09.03.2025).

чается суммированием по всем зданиям населенного пункта [6, 13, 14]. Такой метод может иметь широкое применение при обладании определенными навыками программирования и не требует больших материальных затрат. Так, в нашей предыдущей работе [14] приведены оценки АПТ для 47 городов России с населением не менее полумиллиона человек. В данной работе рассчитан АПТ для 12 населенных пунктов, расположенных в приполярных и полярных областях России.

С использованием открытой веб-картографической платформы OpenStreetMap (OSM)⁴, сервиса Яндекс Карты⁵ и ГИС ЖКХ⁶ получена информация о контурах зданий и их высотах, на основе которой построены двух- и трехмерные (точнее 2,5-мерные) модели городской застройки, позволившие найти площадь ограждающей конструкции каждого здания и его объем, которые в совокупности с теплофизическими характеристиками здания позволяют оценить АПТ [13, 14].

На основе СП 50.13330.2012 реализованы три алгоритма оценки АПТ. Первый базируется на нормируемом значении сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций здания. Второй использует понятие удельной теплозащитной характеристики здания. В основе третьего лежит расчетное значение удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Необходимость рассмотрения трех различных алгоритмов обусловлена тем, что в первом алгоритме АПТ рассчитывается по площади ограждающей конструкции здания, во втором и третьем — по его объему, но, в отличие от первого и второго, в третьем алгоритме учитываются потери тепла через вентиляцию. Первые два регламентируют теплозащитные характеристики оболочки здания, а также учитывают климатические условия, а третий алгоритм регламентирует расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию. К тому же использование первого алгоритма позволяет оценить АПТ через нижнюю границу здания вниз.

Эти методики используют данные из свода правил, являющиеся, по сути, средними значениями, полученными в результате обработки большого массива данных. Кроме этого, СНиП, а затем свод правил менялись с течением времени. Здания, построенные как до появления СНиП и свода правил (до 1929 г.), так и после, могут им не удовлетворять. Поэтому мы рассматривали все три алгоритма, позволяющие оценить диапазон возможных значений АПТ с территории города.

АПТ оценивали как по средней температуре воздуха в течение отопительного периода t_{OT} (СП 131.13330.2020), так и по ежедневным среднесуточным температурам воздуха⁷ в течение отопительных периодов 2013–2018 и 2018–2023 гг.

Построены карты распределения плотности антропогенной энергии населенных пунктов в полярной области России за отопительный период при температуре наружного воздуха $t_{НАР}$ равной t_{OT} , которые могут быть полезны для уточнения составляющих теплового баланса при моделировании региональной атмосферы и городского приземного слоя.

⁴ OSM. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org> (accessed 09.03.2025).

⁵ Картографический сервис Яндекс Карты. URL: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 09.03.2025).

⁶ Государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства. Реестр объектов жилищного фонда. URL: <https://dom.gosuslugi.ru/#!/houses> (дата обращения: 09.03.2025).

⁷ Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 09.03.2025).

Об актуальности предлагаемого исследования говорит то, что в в моделях прогноза погоды и климата из-за недостаточного их разрешения непосредственный учет теплообмена между городскими зданиями и атмосферой в настоящий момент невозможен. Для решения этой проблемы необходимо использовать параметризацию потока тепла от городской застройки. Как правило, такая параметризация базируется на представлении городского каньона в виде двух зданий, стоящих через дорогу напротив друг друга [11]. В настоящей работе оценивается поток тепла от реальных городских зданий с разрешением 30×30 м², что позволяет сформулировать более адекватные краевые условия для уравнения теплового баланса в региональных моделях прогноза погоды и климата и уточнить параметризацию антропогенного потока тепла.

Цель данной работы состояла в: а) оценке АПТ для 12 населенных пунктов, расположенных в высоких широтах и примыкающих к ним умеренных широтах; б) оценке теплового потока, направленного вниз к подстилающей поверхности через нижнюю границу здания, что важно при анализе таяния вечной мерзлоты в городских условиях; в) оценке пространственного распределения АПТ; г) определении зависимости АПТ от численности населения и объема зданий городской застройки; д) оценке средних значений АПТ за пятилетние периоды 2013–2018 и 2018–2023 гг.

Геометрическая модель населенного пункта

Построены геометрические модели городов и населенных пунктов России, расположенных за северным полярным кругом или вблизи него: Сургу́та, Якутска, Архангельска, Мурманска, Норильска, Воркуты, Апатитов, Салехарда, Нарьян-Мара, Дудинки, Тикси и Диксона⁸. В дальнейшем для удобства изложения любой из перечисленных населенных пунктов будем называть городом.

Среди различных геоинформационных сервисов, таких как Яндекс Карты, Google Maps⁹, 2ГИС¹⁰, OpenStreetMap (OSM) и других, позволяющих визуализировать городскую застройку, только OSM дает возможность получить контуры зданий в векторном формате, что позволяет точно оценить их площадь. По этой причине модели городов построены на основе данных веб-картографического ресурса OSM, который также содержит информацию о материалах и типах зданий, дорогах, зеленых насаждениях и т. п. На основании такой информации определены контуры зданий и, в некоторых случаях, их высота и тип.

Недостающие данные о высоте некоторых зданий доступны напрямую из сервиса Яндекс Карты через сайт Народная карта¹¹, где приведена информация об адресе, типе и высоте зданий. При отсутствии таких данных использовали информацию с сервиса ГИС ЖКХ (которая не учитывалась в более ранних работах [6, 13, 14]). В рассматриваемых городах для 80 % строений известна высота, за исключением Тикси (56 %), Диксона (59 %), Якутска (65 %) и Воркуты (73 %). Зданиям с неизвестной высотой, а это, как правило, одноэтажные строения небольшой площади, присваивается высота, равная 3 м.

⁸ Список упорядочен по мере уменьшения численности населения.

⁹ Google Maps. URL: <https://www.google.com/maps/> (дата обращения: 09.03.2025).

¹⁰ Картографический сервис «2ГИС». URL: <https://2gis.ru/> (дата обращения: 09.03.2025).

¹¹ Народные карты (редактор Яндекс Карт). URL: <https://n.maps.yandex.ru/> (дата обращения: 09.03.2025).

Для вычисления площади и объема здания написан скрипт на языке Python [16], собирающий геометрическую и географическую информацию из OSM и учитывающий высоту зданий.

Численность населения¹² и основные параметры городской застройки приведены в табл. 1, где данные, относящиеся к административной территории, приведены в верхней строке, соответствующей названию города, а к урбанизированной — в нижней строке.

Таблица 1

Численность населения и параметры зданий
на административной (верхняя строка) и урбанизированной (нижняя строка) территории
Table 1

Population and building parameters
for administrative (top row) and urbanized (bottom row) territories

Город	Население, человек	Средняя высота зданий, м	Площадь стен, 10 ⁶ м ²	Площадь крыш, 10 ⁶ м ²	Объем зданий, 10 ⁶ м ³	Показатель компактности, м ⁻¹	Площадь территории, 10 ⁶ м ²	Доля крыш в общей площади, %
Сургут	396443	6,1	13,4	8,18	0,0930	0,320	196,8	4,16
		15,0	10,3	4,96	0,0770	0,262	15,53	31,9
Якутск	355443	6,1	13,0	8,15	0,0730	0,401	181,1	4,50
		13,7	7,81	3,81	0,0540	0,286	13,63	28,0
Архангельск	301199	6,8	13,2	8,29	0,0802	0,371	339,5	2,44
		15,3	9,03	4,44	0,0617	0,290	15,88	28,0
Мурманск	270384	10,5	9,15	5,46	0,0583	0,344	170,9	3,19
		19,1	7,30	2,71	0,0456	0,279	10,25	26,4
Норильск	174453	13,6	4,47	1,86	0,0275	0,298	20,06	9,27
		19,3	4,22	1,49	0,0259	0,278	5,46	27,3
Воркута	56985	10,4	2,75	1,75	0,0175	0,357	82,60	2,12
		12,4	2,41	1,27	0,0155	0,319	4,94	25,7
Апатиты	49647	8,3	2,06	1,53	0,0149	0,344	32,23	4,75
		14,4	1,61	0,87	0,0119	0,282	3,06	28,4
Салехард	47910	6,7	2,51	1,54	0,0136	0,411	76,24	2,02
		12,2	1,52	0,75	0,0096	0,315	2,99	25,1
Нарьян-Мар	23399	9,2	1,61	0,80	0,0075	0,428	46,14	1,73
		22,8	1,05	0,35	0,0052	0,337	1,59	22,0
Дудинка	19556	9,5	0,69	0,49	0,0044	0,380	10,96	4,47
		16,5	0,53	0,22	0,0032	0,303	0,83	26,5
Тикси	4173	7,9	0,31	0,27	0,0018	0,472	5,090	5,30
		14,1	0,16	0,07	0,0009	0,333	0,32	21,9
Диксон	319	6,5	0,28	0,23	0,0014	0,529	0,890	25,84
		11,5	0,11	0,05	0,0006	0,350	0,26	19,2

¹² По переписи 2020 г.

Доля площади крыш относительно площади административной территории находится в интервале от 1,7 до 9,3 % за исключением поселения Диксон (25,8 %). Таким образом, площадь застройки на административной территории не превышает 10 % для одиннадцати рассматриваемых городов, что совпадает с плотностью застройки в городах России с населением не менее полумиллиона человек [14]. Следовательно, целесообразно рассматривать *урбанизированную территорию*, так как не менее 90 % административной территории не генерируют АПТ.

За *урбанизированную территорию* принимается часть города со зданиями высотой не менее 6 м, а ее площадь определяется суммарной площадью ячеек сетки, содержащих хотя бы часть одного такого здания. Ячейки расчетной сетки не относятся к урбанизированной территории, если они не содержат элементы зданий. Например, не относятся к урбанизированной территории сады, парки, площади, дворы и т. п. [13, 14].

На административной территории медианное значение высоты зданий колеблется от 3,0 до 15,0 м, оно равно 15,0 м для Норильска, 9,0 м для Воркуты, 3,0 для Сургута и 6,0 м для остальных городов. На урбанизированной территории медианная высота находится в диапазоне от 9,0 до 15,0 м, причем для Сургута, Якутска, Салехарда и Диксона она равна 9,0 м, для Архангельска и Воркуты — 10,0 м, а для остальных городов — 15,0 м.

Отношение площади поверхностей наружных ограждающих конструкций к заключенному в них объему здания называется эффективным показателем компактности здания. Более высокие значения показателя компактности соответствуют более высокому уровню теплопотерь, например, АПТ с одного квадратного метра возрастает в 2–2,3 раза в зависимости от климатических условий при увеличении этого показателя с 0,15 до 0,65 м⁻¹ [17]. На административной территории среднее значение показателя компактности по выборке — 0,39 м⁻¹, заметим, что для крупных городов средний по выборке показатель компактности также равен 0,39 м⁻¹ [14]. На урбанизированной территории показатель компактности меньше, он составляет порядка 66–93 % относительно административных границ. Таким образом, здания на урбанизированной территории обладают большей энергоэффективностью, что приводит к меньшей эмиссии тепловой энергии с 1 м³.

Во время отопительного периода некоторые здания не излучают тепло. Их можно определить как по типу, так и по площади, а проверить тип — по атрибутивной информации из OSM [16]. К таким зданиям относятся постройки площадью меньше 20 м², которые являются либо вспомогательными и не отапливаются, либо дают незначительный вклад в общий поток тепла, а также гаражи, стоянки, водонапорные башни, цистерны, элеваторы и т. п., поэтому они были удалены из модели [13, 14].

Площадь урбанизированной территории относительно административной территории соответственно составляет 29 % для Диксона и 27 % для Норильска, для остальных городов это отношение находится в интервале 3–9 %, при этом на урбанизированной территории площадь застройки (крыш) занимает порядка 20–30 %.

На рис. 1 в качестве примера приведена построенная геометрическая модель района Гвардейской площади в г. Норильске и фотография этой площади со стороны ул. Кирова. Сравнение фотографии и модели, по крайней мере визуальное, указывает на правильность модели городской застройки (это также подтверждается изображениями городской застройки в [13, 14]).

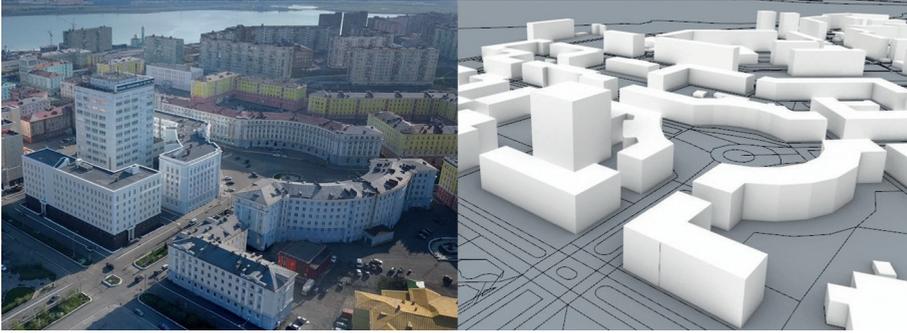


Рис. 1. Вид на Гвардейскую площадь со стороны ул. Кирова в г. Норильске (слева) и трехмерная модель этой же территории (справа)

Fig. 1. View of Gvardeyskaya Square from the Kirov St. in Norilsk (left) and a three-dimensional model of the same territory (right)

По геометрической модели вычислены площади всех ограждающих конструкций, что необходимо для оценки АПТ по первому алгоритму, а также объемы всех зданий, являющиеся основой для определения АПТ по второму и третьему алгоритмам. Построенная модель позволяет рассчитать пространственное распределение АПТ с произвольным разрешением, которое в данной работе выбрано равным $30 \times 30 \text{ м}^2$.

Расчет антропогенного потока тепла

Три алгоритма расчета АПТ разработаны при предположении, что городские здания соответствуют действующим строительным нормам СП 131.13330.2020, СП 50.13330.2012 и ГОСТ 30494-2011. Первый и третий алгоритмы описаны в более ранних работах [6, 13, 14], второй алгоритм излагается впервые. Оценка АПТ происходит с учетом разности температур воздуха внутри $t_{\text{вн}}$ и снаружи $t_{\text{нар}}$ здания.

Первый алгоритм [13, 14] использует «нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций» $R_i^{\text{НОР}}$. Приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций $R_i^{\text{ПП}}$ «должно быть не меньше нормируемых значений (поэлементные требования)» (пункт 5.1 в СП 50.13330.2012). Значение $R_i^{\text{НОР}}$ зависит от региона и определяется средней многолетней величиной «градусосутки отопительного периода (ГСОП)» (см. (5.2) в СП 50.13330.2012)

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

где $t_{\text{от}}$ — средняя температура атмосферного воздуха за время отопительного периода, °С, и $t_{\text{от}}$ — его продолжительность, сут., берутся из таблицы 3.1 в СП 131.13330.2020.

$R_i^{\text{ПП}}$ выбирается равным $R_i^{\text{НОР}}$, что соответствует максимальному уровню теплопотерь здания. Согласно формуле (5.1) в СП 50.13330.2012, $R_i^{\text{НОР}}$ равно требуемому сопротивлению теплопередаче $R_i^{\text{ТР}}$ при коэффициенте $m_p = 1$, где используются интерполированные значения $R_i^{\text{ТР}}$ из таблицы 3 СП 50.13330.2012 для жилых зданий, гостиниц и общежитий. В значениях коэффициента учитываются наихудшие погодные условия, в том числе ветровая нагрузка и высокая влажность.

Коэффициент теплопередачи K_i , Вт/(м²·°С) через i -й элемент ограждающей конструкции вычисляется по формуле (см. табл. 3 в СП 50.13330.2012),

$$K_i = 1/R_i^{\text{TP}}. \quad (2)$$

Таким образом, АПТ (Вт) от разных частей ограждающей конструкции, попадающих в j -ю ячейку расчетной сетки,

$$Q_F^i(j) = K_i(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})S_i(j), \quad (3)$$

где $S_i(j)$, м², — суммарная площадь i -х элементов ограждающей оболочки, попавших в j -ю ячейку; $i = 1$ — стены, $i = 2$ — крыши и нижняя граница зданий, $i = 3$ — светопрозрачные конструкции, кроме фонарей.

Коэффициенты теплопередачи K_i принимаются постоянными для всего города.

Второй алгоритм использует «нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания» $k_{\text{Об},i}^{\text{TP}}$, Вт/(м³·°С). Удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения, величина которого определяется отопляемым объемом здания и градусо-сутками отопительного периода в районе строительства согласно табл. 7 и формулам (5.5) и (5.6) в СП 50.13330.2012,

$$Q_F^i(j) = k_{\text{Об},i}^{\text{TP}}(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})V_i(j), \quad (4)$$

где $V_i(j)$ — объем части i -го здания, попадающего в j -ю ячейку, м³, а $k_{\text{Об},i}^{\text{TP}}$ — нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики этой части здания.

Третий алгоритм [13, 14] использует «нормируемую (базовую) удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания» $q_{\text{От}}^{\text{TP}}$ (см. пункт 10 в СП 50.13330.2012).

Расчетное значение удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания $q_{\text{От}}^{\text{P}}$ не должно превышать $q_{\text{От}}^{\text{TP}}$, Вт/(м³·°С), которое определяется количеством этажей и типом здания (см. табл. 14 в СП 50.13330.2012).

Значение $q_{\text{От}}^{\text{P}}$ зависит от солнечной радиации (которая мала), внутреннего теплоступления, вентиляции, теплозащитных характеристик здания. Два последних параметра определяются климатическими условиями. Величина $q_{\text{От}}^{\text{P}}$ должна рассчитываться для каждого здания, что нереально, так как отсутствует подробная информация о конструкции зданий и их инженерных системах. Учитывая, что должно быть $q_{\text{От}}^{\text{P}} \leq q_{\text{От}}^{\text{TP}}$, для получения верхней оценки теплопотерь здания в расчетах принимается $q_{\text{От}}^{\text{P}} = q_{\text{От}}^{\text{TP}}$, где $q_{\text{От}}^{\text{TP}}$ определяется только этажностью и типом здания и не зависит от климатических условий в регионе строительства. В конечном счете тепловая энергия, расходуемая на отопление и вентиляцию, выделяется в окружающую среду в виде АПТ.

АПТ (Вт) от i -й части здания, находящегося в j -й расчетной ячейке,

$$Q_F^i(j) = q_{\text{От},i}^{\text{TP}}(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})V_i(j), \quad (5)$$

где $q_{\text{От},i}^{\text{TP}}$ — нормируемая удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания i -го типа, Вт/(м³·°С), $V_i(j)$ — объем части i -го здания в ячейке j , м³.

АПТ от разных зданий в j -й ячейке (см. (3)–(5)),

$$Q_F(j) = \sum_i Q_F^i(j).$$

Отсюда получаем оценку АПТ для территории

$$Q_F = \sum_{j=1}^N Q_F(j),$$

где N — число расчетных ячеек, покрывающих территорию.

Потери тепла из-за вентиляции здания оцениваются в 20 % от общих потерь [18], поэтому итоговое значение Q_F в рамках *первого* и *второго* алгоритмов необходимо откорректировать:

$$Q_F = \frac{Q_F}{80\%} 100\%.$$

При транспортировке тепла к зданиям по магистралям, расположенным под землей, теряется порядка 10 % в виде тепловых стоков $\Delta Q_{F,g}$, поэтому АПТ Q_F в рамках всех алгоритмов должен быть увеличен на величину теплового стока:

$$Q_F = Q_F + \Delta Q_{F,g} = (1 + 0,1) Q_F.$$

Плотность АПТ, усредненная по региону,

$$\bar{Q}_F = \frac{Q_F}{S_{\text{тер}}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{тер}}$ — площадь административной или урбанизированной территории.

Коэффициенты теплопередачи K_i (см. (3)) постоянны в пределах города, $k_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ зависят от объема здания, $q_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ определяется типом и высотой здания, т. е. $k_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ и $q_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ индивидуальны для каждого городского здания.

В рамках первого алгоритма АПТ пропорционален площади ограждающих конструкций здания (см. (3)), в рамках второго и третьего — объему здания (см. (4) и (5)). Во всех алгоритмах для АПТ дается оценка сверху.

Отклонение расхода энергии на отопление и вентиляцию $q_{\text{от}}^{\text{П}}$ от нормируемой величины $q_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ определяет класс энергоэффективности здания, поэтому знание класса энергоэффективности позволяет уточнить фактический расход энергии. Городским зданиям в настоящий момент присваиваются классы энергоэффективности, это позволит в будущем при расчете АПТ в рамках третьего алгоритма получить более точную оценку энергопотребления, что делает эту методику более перспективной. Как правило, первый алгоритм дает минимальную оценку АПТ, а третий — максимальную, поэтому можно предложить использовать усредненную по алгоритмам оценку АПТ.

АПТ с территорий, не содержащих здания (пустые ячейки расчетной сетки), принимается нулевым.

Рассматриваемые методики используют данные из свода правил, являющиеся, по сути, средними значениями, полученными в результате обработки большого массива данных, поэтому полученные результаты приводят к усредненной по территории оценке АПТ.

Суммарный АПТ за весь отопительный период во всех алгоритмах может быть вычислен, например, в результате умножения Q_F при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ на длительность

отопительного периода $d_{от}$ (СП 131.13330.2020) или суммированием за дни отопительного периода с учетом наблюдаемых среднесуточных температур [13, 14].

При расчете АПТ температура воздуха в помещении $t_{вн}$ (см. (1), (3)–(5)) принимается равной 20 °С [13, 14].

Результаты моделирования антропогенного потока тепла для северных городов в течение отопительного периода

Полный АПТ вычисляется как в рамках административных границ, так и по урбанизированной территории. В среднем по выборке доля площади стен равна 70 %, площади крыш — 50 %, объема зданий — 73 %. Отсюда следует, что АПТ с урбанизированной территории ориентировочно должен быть порядка 60–80 % от АПТ с административной территории города.

Выделяемая с административной и урбанизированной территорий в течение отопительного сезона усредненная по региону плотность АПТ (Вт/(м²·°С)) (см. (6)) при разности между внутренней $t_{вн}$ и наружной $t_{нар}$ температурами воздуха в 1 °С ($t_{вн} - t_{нар} = 1$ °С) по трем алгоритмам, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Средняя плотность антропогенного потока тепла при разности между внутренней $t_{вн}$ и наружной $t_{нар}$ температурами воздуха в 1 °С (Вт/(м²·°С))
Table 2

The average density of anthropogenic heat flow with the difference between the internal $t_{вн}$ and external $t_{нар}$ air temperatures of 1 °С (W/(m²·°С))

Город	$t_{от}, °С$	Административные границы			Урбанизированная территория		
		Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3	Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3
Сургут	–9,3	0,066	0,102	0,163	0,592	0,963	1,68
Якутск	–20,6	0,060	0,085	0,147	0,445	0,671	1,38
Архангельск	–4,5	0,041	0,062	0,086	0,559	0,885	1,34
Мурманск	–3,3	0,055	0,082	0,124	0,638	1,01	1,61
Норильск	–15	0,167	0,227	0,506	0,557	0,769	1,75
Воркута	–9,5	0,030	0,042	0,077	0,415	0,595	1,11
Апатиты	–4,5	0,070	0,105	0,170	0,516	0,830	1,38
Салехард	–11,3	0,029	0,041	0,069	0,425	0,622	1,18
Нарьян-Мар	–7,3	0,031	0,041	0,061	0,522	0,698	1,16
Дудинка	–15,0	0,055	0,072	0,145	0,470	0,651	1,41
Тикси	–19,4	0,053	0,067	0,134	0,375	0,469	1,09
Диксон	–11,2	0,281	0,360	0,697	0,308	0,423	0,96

В рамках рассматриваемой выборки разброс значений средней плотности АПТ, при $t_{вн} - t_{нар} = 1$ °С, для административной и урбанизированной территорий составляет в Вт/(м²·°С) 0,03–0,28 и 0,31–0,64 по первому алгоритму; 0,04–0,36 и 0,42–1,00 по второму алгоритму; 0,06–0,70 и 0,96–1,75 по третьему алгоритму соответственно.

Средняя плотность АПТ (в Вт/м²) может быть получена при умножении данных табл. 2 на разность температур между внутренним $t_{вн}$ и наружным $t_{нар}$ воздухом ($t_{вн} - t_{нар}$). Средняя плотность АПТ (Вт/м²) с административной и урбанизированной

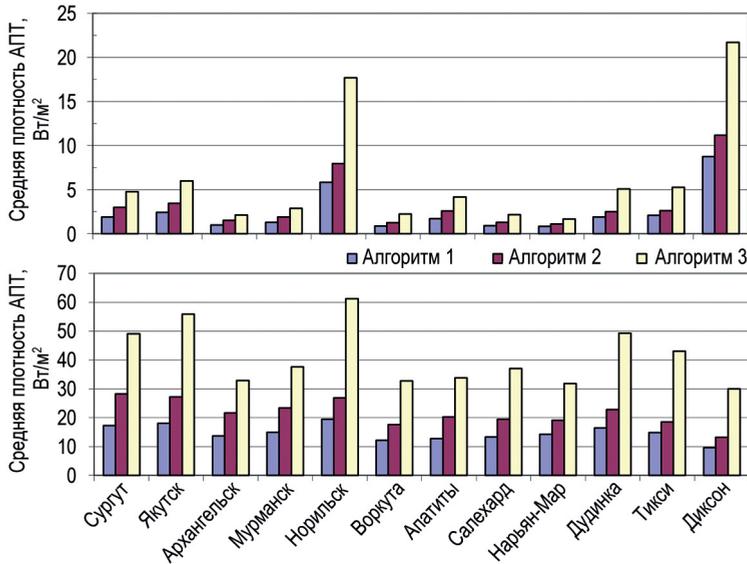


Рис. 2. Средняя плотность антропогенного потока тепла с административной (верхний рисунок) и урбанизированной (нижний рисунок) территории при температуре наружного воздуха $t_{\text{НАР}}$ равной средней температуре отопительного периода $t_{\text{ОТ}}$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$)

Fig. 2. The average density of anthropogenic heat flow from the administrative (top drawing) and urbanized (bottom drawing) territories with the outdoor temperature $t_{\text{НАР}}$ equal to the average temperature of the heating period $t_{\text{ОТ}}$ (W/m^2)

территорий при температуре наружного воздуха $t_{\text{НАР}}$ равной средней температуре отопительного сезона $t_{\text{ОТ}}$ ($t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$) СП 50.13330.2012, показана на рис. 2.

На административной территории значения средней плотности АПТ при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ находятся в диапазоне 0,84–8,8, 1,12–11,2 и 1,67–21,7 $\text{Вт}/\text{м}^2$ по 1-му, 2-му и 3-му алгоритмам соответственно, а для урбанизированной территории имеем 9,60–19,5, 13,2–28,2 и 30,0–61,2 $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Для сравнения, согласно модели крупномасштабного городского потребления энергии (LUCY) глобальный средний городской АПТ имеет суточный диапазон 0,7–3,6 $\text{Вт}/\text{м}^2$ и больше, например, в Ванкувере в отдельных ячейках сетки он может достигать 119 $\text{Вт}/\text{м}^2$, а в Лондоне — 106,7 $\text{Вт}/\text{м}^2$ [3]. В оценках, приведенных для Томска [19], плотность АПТ, обусловленного отоплением с ноября по февраль, находится в интервале от 3 до 4 $\text{Вт}/\text{м}^2$, аналогичная оценка для Томска в [20] заключается в интервале от 2,48 до 3,84 $\text{Вт}/\text{м}^2$. Согласно расчетам в [14], полученным по первому и третьему алгоритмам, рассматриваемым в данной статье, плотность АПТ при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ для Томска с административной территории равна 2,93 и 6,91 $\text{Вт}/\text{м}^2$ соответственно.

Умножая среднюю плотность АПТ (см. табл. 2) на $(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})$ и на длительность суток (в сек.), получим среднюю плотность антропогенной энергии, выделяемой с административной и урбанизированной территорией. В рамках административных границ плотность антропогенной энергии, излучаемая в течение суток, находится в пределах 0,05–0,54 $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ по первому алгоритму, 0,06–0,69 $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ по

второму и 0,12–1,34 МДж/(м²·сут) по третьему. Для урбанизированной территории соответственно имеем 0,59–2,24, 0,77–3,52 и 1,67–5,66 МДж/(м²·сут).

Умножая среднюю плотность АПТ (см. табл. 2) на $(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})$, на длительность суток (в сек.) и на площадь административной (или урбанизированной) территории из табл. 1, найдем антропогенную энергию, выделяемую с территории за сутки. Далее суммируя эту энергию за весь срок или конкретные дни отопительного периода, получаем оценку излучаемой антропогенной энергии.

Средняя антропогенная энергия, излучаемая за отопительный сезон с административной (верхняя строка для каждого города) и урбанизированной (нижняя строка) территорий при ежедневной среднесуточной температуре наружного воз-

Таблица 3

Средняя энергия (10¹⁵ Дж), выделяемая за отопительный сезон с административной (верхняя строка) и урбанизированной (нижняя строка) территории при среднесуточной температуре наружного воздуха $t_{\text{НАР}}$ усредненной в течение 2013–2018 и 2018–2023 гг.

Table 3

The average energy (10¹⁵ J) emitted during the heating season from the administrative (top row) and urbanized (bottom row) territories with the average daily outdoor air temperature $t_{\text{НАР}}$ averaged over 2013–2018 and 2018–2023

Город	Алгоритм 1		Алгоритм 2		Алгоритм 3	
	2013–2018	2018–2023	2013–2018	2018–2023	2013–2018	2018–2023
Сургут	7,29	6,84	11,37	10,66	18,2	17,0
	5,42	5,05	8,83	8,22	15,37	14,31
Якутск	8,56	8,47	12,12	12,00	21,1	20,9
	4,94	4,90	7,46	7,39	15,30	15,15
Архангельск	6,52	6,67	9,81	10,02	13,6	13,9
	4,12	4,21	6,53	6,68	9,90	10,11
Мурманск	4,64	4,76	6,92	7,09	10,4	10,7
	3,23	3,31	5,09	5,22	8,18	8,39
Норильск	2,64	2,52	3,60	3,44	8,02	7,66
	2,40	2,29	3,31	3,17	7,53	7,19
Воркута	1,67	1,63	2,34	2,29	4,27	4,16
	1,38	1,35	1,98	1,94	3,71	3,62
Апатиты	1,11	1,14	1,66	1,71	2,69	2,76
	0,77	0,80	1,24	1,28	2,06	2,13
Салехард	1,59	1,53	2,22	2,13	3,74	3,59
	0,90	0,87	1,32	1,27	2,52	2,42
Нарьян-Мар	0,866	0,829	1,15	1,10	1,73	1,65
	0,506	0,485	0,677	0,648	1,128	1,081
Дудинка	0,474	0,452	0,623	0,596	1,25	1,20
	0,308	0,294	0,426	0,407	0,923	0,882
Тикси	0,255	0,246	0,321	0,310	0,643	0,620
	0,113	0,109	0,142	0,137	0,331	0,319
Диксон	0,223	0,217	0,285	0,277	0,552	0,538
	0,071	0,069	0,098	0,095	0,223	0,217

духа¹³, усредненная за каждый из периодов 2013–2018 и 2018–2023 гг., приведена в табл. 3. При этом вычислении отопительный сезон начинается, когда в течение 5 суток среднесуточная температура воздуха не превышает 8 °С, и заканчивается, если среднесуточная температура воздуха превышает 8 °С.

Сургут, Якутск, Норильск, Дудинка и Тикси характеризуются более низкой наблюдаемой средней среднесуточной температурой в течение отопительного сезона за период 2018–2023 гг. по сравнению с предшествующим, но их отопительный сезон является более коротким. В остальных городах средняя температура отопительного сезона выше, но при этом в Архангельске, Мурманске, Воркуте и Апатитах отопительный сезон длиннее, а в Салехарде, Нарьян-Маре и Диксоне — короче. В итоге за период 2018–2023 гг. в Архангельске, Мурманске и Апатитах выделенная антропогенная энергия больше, чем за предшествующий период, а в остальных городах — меньше.

Из табл. 3 следует, что за исключением Архангельска, Мурманска и Апатитов период 2018–2023 гг. характеризуется несколько меньшим объемом антропогенного тепла, чем предыдущий.

Доля антропогенной энергии, излучаемой за отопительный сезон с урбанизированной территории, при учете ежедневной среднесуточной температуры наружного воздуха, и усредненная за 5-летний период 2018–2023 гг., по всем алгоритмам относительно административной территории составляет в %: для Сургута — 74–84, Якутска — 58–73, Архангельска — 63–73; Мурманска — 70–78; Норильска — 91–94; Воркуты — 83–87; Апатитов — 70–77; Салехарда — 57–67; Нарьян-Мара — 58–65; Дудинки — 65–74; Тикси — 44–51; Диксона — 32–40. Хотя антропогенная энергия с урбанизированной территории меньше, чем с административной, но она локализована на 10 % административной территории (см. табл. 1, за исключением Диксона и Норильска).

Согласно данным по теплоснабжению: в Сургуте отпуск тепловой энергии за 2021 г. составляет 3916,88 тыс. Гкал¹⁴, что эквивалентно 16,4 ПДж; в Якутске за 2008 г. аналогично имеем 2210 тыс. Гкал¹⁵, или 9,25 ПДж; в Мурманске за 2024 г. 2004,3 тыс. Гкал¹⁶, или 6,28 ПДж; в Апатитах и Кировске за 2024 г. 1524,81 тыс. Гкал¹⁷, или 6,38 ПДж, что дает для Апатитов 4,79 ПДж¹⁸; в Салехарде за 2015 г. отпущено в сеть 495,24 тыс. Гкал¹⁹, или 1,61 ПДж, в Нарьян-Маре за 2012 г. потрачено на отопле-

¹³ Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 09.03.2025).

¹⁴ Обосновывающие материалы к актуализированной схеме теплоснабжения городского округа город Сургут на период до 2035 года (Актуализация на 2023 год). Книга 3. Глава 2. Существующее и перспективное потребление тепловой энергии на цели теплоснабжения. Исполнитель: ООО «ДЖИ ДИНАМИКА». г. Санкт-Петербург, 2022 г. https://admsurgut.ru/files/materials/files/files6/Книга_3_Глава_2_Перспектива-1.pdf (дата обращения: 11.03.2025).

¹⁵ Гаврилов С.Ю., Андриевский В.В. Особенности схемы централизованного теплоснабжения г. Якутска. Новости теплоснабжения. 2009; 3(103). https://www.rosteplu.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2674 (дата обращения: 11.03.2025).

¹⁶ <https://www.tgc1.ru/production/complex/kolsky-branch/> (дата обращения: 11.03.2025).

¹⁷ Указана суммарная тепловая мощность, потребляемая Апатитами и Кировском, поэтому приведенное значение скорректировано с учетом объема зданий для города Апатиты

¹⁸ То же, что 17.

¹⁹ <https://docs.cntd.ru/document/444824558> (дата обращения: 11.03.2025).

ние с учетом потерь в теплосетях 271,1 тыс. Гкал²⁰, или 1,14 ПДж. Указанные значения в целом согласуются с результатами в табл. 3, но заметим, что особенно в небольших северных поселениях для отопления также используется электрическая энергия.

Анализ результатов показывает, что существует линейная зависимость между выделяемой антропогенной энергией и объемом зданий, представленная в табл. 4 и 5 (в которых Апатиты отнесены к группе городов с населением не менее 50 тысяч человек).

Гистограммы антропогенной энергии и ее плотности, а также карты распределения плотности антропогенной энергии, выделяемой за отопительный период при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ с административных территорий Воркуты и Апатитов, изображены для трех алгоритмов на рис. 3 и 4.

Таблица 4

Коэффициент линейной регрессии (МДж/м³) между антропогенной энергией, выделяемой с административной и урбанизированной территориями в течение отопительного периода (при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), и суммарным объемом зданий

Table 4

Linear regression coefficient (MJ/m³) between anthropogenic energy emitted from administrative and urbanized territories during the heating period (with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), and the total volume of buildings

Алгоритмы	В случае административной территории			В случае урбанизированной территории		
	Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 50 тыс. чел.	По всей выборке	Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 50 тыс. чел.	По всей выборке
1	98,6 ($R^2 = 0,94$)	90,2 ($R^2 = 0,75$)	97,0 ($R^2 = 0,94$)	90,6 ($R^2 = 0,96$)	63,1 ($R^2 = 0,85$)	79,0 ($R^2 = 0,97$)
2	143,6 ($R^2 = 0,96$)	145,0 ($R^2 = 0,84$)	146,8 ($R^2 = 0,96$)	136,0 ($R^2 = 0,98$)	114,4 ($R^2 = 0,92$)	126,6 ($R^2 = 0,99$)
3	243,0 ($R^2 = 0,94$)	186,6 ($R^2 = 0,60$)	227,4 ($R^2 = 0,91$)	242,1 ($R^2 = 0,95$)	157,5 ($R^2 = 0,56$)	218,3 ($R^2 = 0,91$)

Таблица 5

Коэффициент линейной регрессии (ГДж/чел.) между антропогенной энергией, выделяемой с административной территории в течение отопительного периода (при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), и численностью населения

Table 5

Linear regression coefficient (GJ/person) between anthropogenic energy emitted from the administrative territory during the heating season (with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$) and the population size

Алгоритмы	Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 50 тыс. чел.	По всей выборке
1	31,9 ($R^2 = 0,95$)	22,7 ($R^2 = 0,92$)	22,0 ($R^2 = 0,95$)
2	44,9 ($R^2 = 0,95$)	34,3 ($R^2 = 0,94$)	33,1 ($R^2 = 0,96$)
3	72,9 ($R^2 = 0,97$)	53,1 ($R^2 = 0,91$)	52,5 ($R^2 = 0,95$)

²⁰ <https://www.rosteplo.ru/w/Нарьян-Мар> (дата обращения: 11.03.2025).

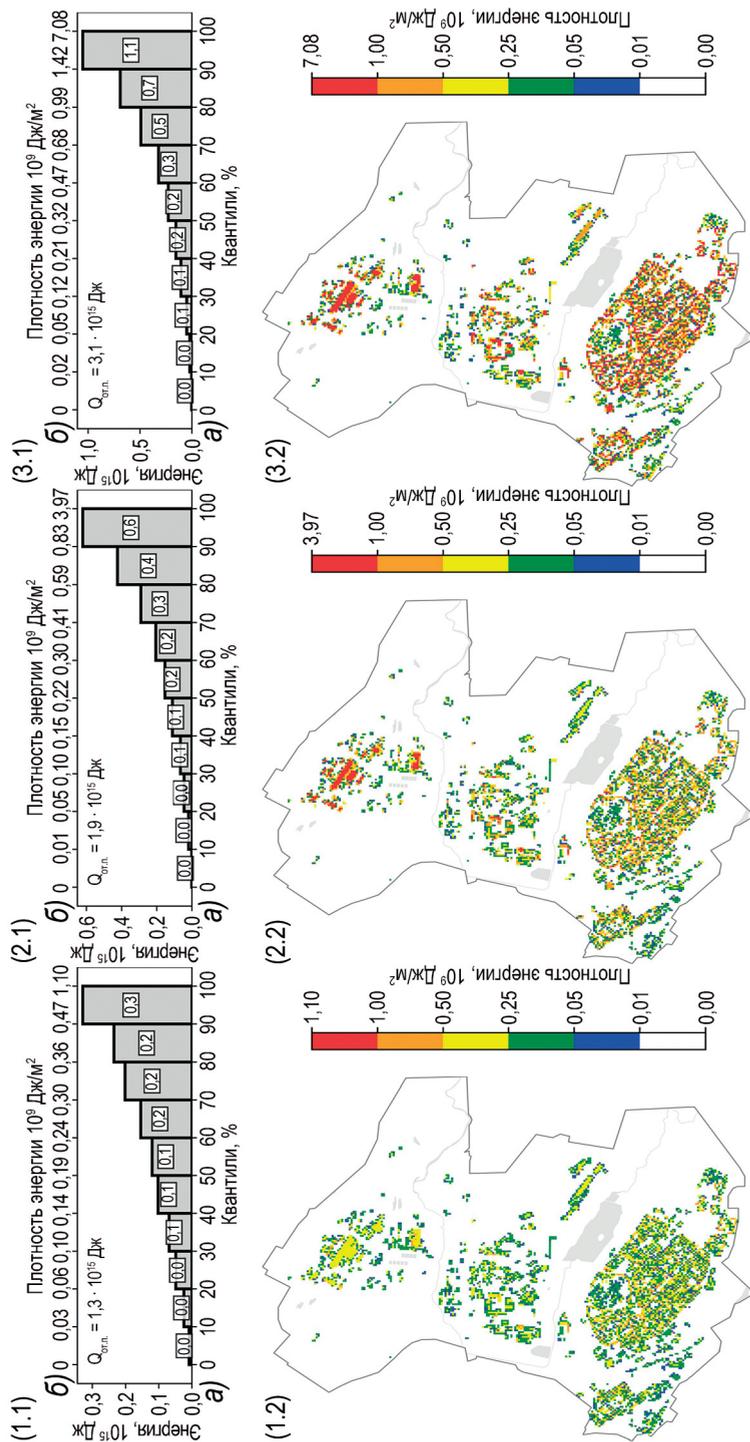


Рис. 4. Гистограммы ((1.1)–(3.1)) распределений антропогенной энергии (ПДж) и плотности антропогенной энергии (ГДж/м²), соответствующие уровням квантилей (а), а также карты ((1.2)–(3.2)) распределения плотности антропогенной энергии (ГДж/м²), рассчитанные по трем алгоритмам, при $t_{НАР} = t_{ОТ}$ за отопительный период с административной территории Апатитов. Числа, приведенные в столбцах на гистограммах (1.1)–(3.1), указывают на количество генерируемой антропогенной энергии в ПДж

Fig. 4. Histograms ((1.1)–(3.1)) of the distributions of anthropogenic energy (PJ) and anthropogenic energy density (GJ/m²), corresponding to the quantile levels (a), and maps ((1.2)–(3.2)) of the distribution of anthropogenic energy density (GJ/m²), calculated using three algorithms, with $t_{НАР} = t_{ОТ}$ for the heating season from the administrative territory of Apatite. The numbers given in the columns on the histograms (1.1)–(3.1) indicate the amount of generated anthropogenic energy in PJ

В Воркуте по первому алгоритму, например (см. рис. 3(1.1)), 10 % зданий выделяют минимальное количество антропогенной энергии 0,009 ПДж с плотностью, не превышающей 0,03 ГДж/м²; 10 % — генерируют 0,036 ПДж с плотностью от 0,03 до 0,07 ГДж/м²; а 10 % — максимально излучают 0,481 ПДж с плотностью от 0,53 до 1,33 ГДж/м². В целом все здания создают энергию в объеме 1,88 ПДж. Аналогичные результаты показаны на рис. 3(2.1) по второму и на рис. 3(3.1) по третьему алгоритмам. Приведены карты распределения плотности антропогенной энергии с территории Воркуты по первому (см. рис. 3(1.2)), второму (см. рис. 3(2.2)) и третьему (см. рис. 3(3.2)) алгоритмам.

На рис. 4 показаны результаты для Апатитов. Визуальное сравнение приведенной тепловой карты Апатитов с полем температуры, полученным по тепловым космическим снимкам высокого пространственного разрешения [10], показывает хорошее согласование между ними.

Использование первого алгоритма позволяет оценить АПТ вниз к подстилающей поверхности от нижней границы здания в течение отопительного сезона. Так, плотность АПТ при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ с урбанизированной территории (в Вт/м²): Сургу́та — 1,96, Якутска — 1,88, Архангельска — 1,65; Мурманска — 1,43; Норильска и Апатитов — 1,60; Воркуты — 1,43; Салехарда — 1,47; Нарьян-Мара — 1,20; Дудинки — 1,69; Тикси — 1,23 и Диксона — 1,20. При этом энергия за отопительный период, выделяемая с урбанизированной территории вниз, соответственно равна (ПДж) для Сургу́та — 0,669; Якутска — 0,557; Архангельска — 0,562; Мурманска — 0,346; Норильска — 0,224; Воркуты — 0,182; Апатитов — 0,114; Салехарда — 0,108; Нарьян-Мара — 0,0474; Дудинки — 0,0358; Тикси — 0,0100 и Диксона — 0,0099.

Коэффициенты линейной регрессии K_V между антропогенной энергией, выделяемой с административной территории вниз к почве, в зависимости от объема зданий и численности населения соответственно приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Коэффициент линейной регрессии (МДж/м³) между антропогенной энергией, выделяемой вниз от нижней границы зданий с административной и урбанизированной территорий в течение отопительного периода (при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), и суммарным объемом зданий

Table 6

Linear regression coefficient (MJ/m³) between anthropogenic energy released downwards from the lower boundary of buildings in administrative and urbanized areas during the heating period (with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), and the total volume of buildings

В случае административной территории			В случае урбанизированной территории		
Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 100 тыс. чел.	По всей выборке	Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 100 тыс. чел.	По всей выборке
13,4 ($R^2 = 0,98$)	14,0 ($R^2 = 0,87$)	12,9 ($R^2 = 0,96$)	11,1 ($R^2 = 0,98$)	9,19 ($R^2 = 0,93$)	8,81 ($R^2 = 0,98$)

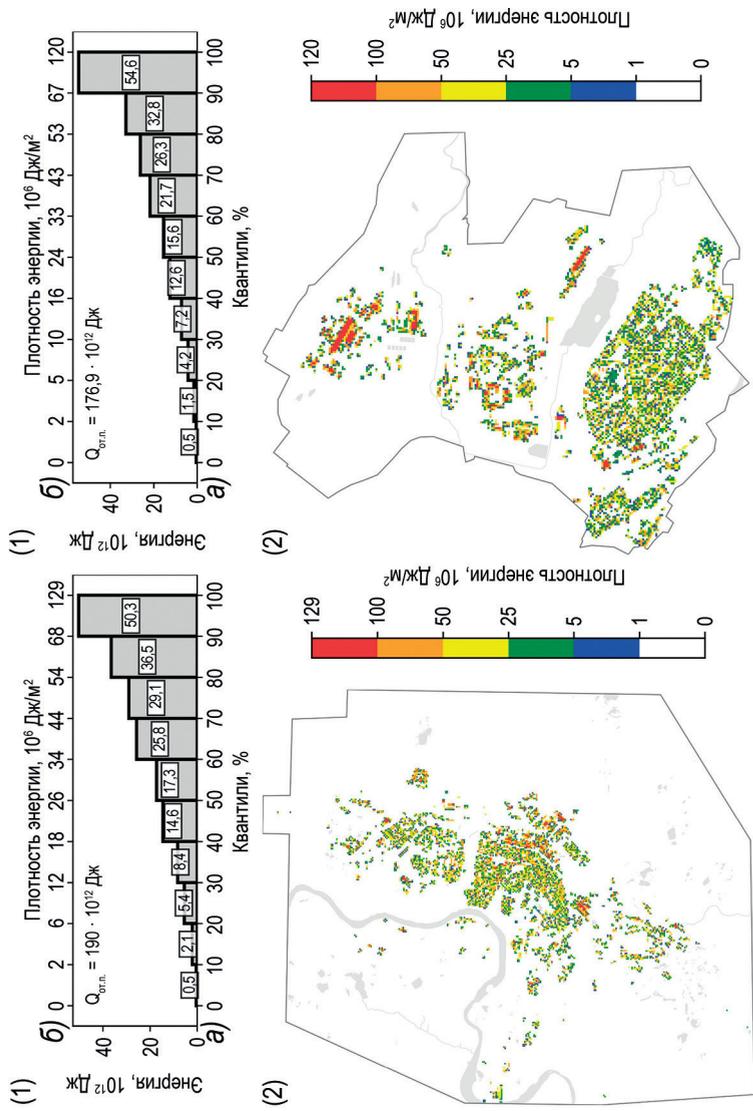


Рис. 5. Антропогенное тепло, направленное вниз к подстилающей поверхности от нижней границы здания, рассчитанное по первому алгоритму, в течение отопительного сезона при $t_{\text{нар}} = t_{\text{от}}$ с территории Воркуты (слева) и Апатитов (справа). Обозначения как на рис. 3
 Fig. 5. Anthropogenic heat directed downwards to the underlying surface from the lower boundary of the building, calculated by the first algorithm, during the heating season from the territory of Vorkuta (left) and Apatite (right). Notation as in Fig. 3

Таблица 7

Коэффициент линейной регрессии (ГДж/чел) между антропогенной энергией, выделяемой вниз от нижней границы зданий с административной территории в течение отопительного периода (при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), и численностью населения

Table 7

Linear regression coefficient (GJ/person) between anthropogenic energy emitted downwards from the lower boundary of buildings from the administrative territory during the heating period (with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), and the population size

Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 50 тыс. чел.	По всей выборке
3,92 ($R^2 = 0,95$)	2,97 ($R^2 = 0,89$)	2,88 ($R^2 = 0,94$)

Антропогенное тепло, напрямую направленное к подстилающей поверхности от нижней границы здания в течение отопительного сезона при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$, для административной территорий Воркуты и Апатитов представлено на рис. 5.

Заключение

Предложен и реализован метод оценки с высоким пространственным разрешением распределения антропогенного потока тепла от городской застройки в течение отопительного периода, который не требует прямых измерений.

Требуемые значения сопротивления теплопередаче R_i^{TP} , приведенные в таблице 3 СП 50.13330.2012, устанавливаются при проектировании здания. Это минимальные требования, а не фактические характеристики существующих конструкций. Реальные здания имеют тепловые мосты (стыки, арматура), износ и ошибки монтажа, что снижает эффективное сопротивление и увеличивает теплопотери. Если при выполнении расчета удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания по третьему алгоритму расчетное значение $q_{\text{ОТ}}^{\text{P}}$ превышает нормируемое значения $q_{\text{ОТ}}^{\text{TP}}$, то допускается уменьшение нормируемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций R_i^{HOP} , что реализуется выбором коэффициента $m_p \leq 1$ (см. (5.1) в СП 50.13330.2012). Следовательно, оценка АПТ по первому алгоритму может быть увеличена до значения, получаемого по второму, поэтому величина АПТ должна находиться между оценками по первому и третьему алгоритмам.

В рамках первого и второго алгоритмов используется предположение, что вентиляция создает дополнительно 20 % теплопотерь [18]. Эта оценка получена для общественных зданий, поэтому величина АПТ, рассчитанная по третьему алгоритму, учитывающему потери тепла на вентиляцию разных типов зданий, отличается от оценки по второму алгоритму.

Таким образом, первые два алгоритма (в отличие от третьего) недостаточно корректно учитывают потери тепла на вентиляцию, а третий не зависит от климатических условий в регионе строительства. К тому же предположение, что здания соответствуют строительным нормам по теплоизоляции, выполняется по городу в среднем. Следовательно, не зная классы энергоэффективности зданий и учитывая неопределенность в теплофизических параметрах зданий, а также то, что каждый из алгоритмов имеет свои минусы и плюсы (учет вентиляции, климатических условий, типов зданий), мы предлагаем использовать усредненную по трем алгоритмам оценку АПТ.

Анализ тепловых карт показывает районы с максимальным уровнем АПТ, т. е. районы с максимальным тепловым воздействием городской среды на атмосферу.

Выделяемая с урбанизированной территории плотность АПТ при средней температуре отопительного периода t_{OT} находится в интервале, нижняя граница которого оценивается от 9,60 до 19,5 Вт/м², а верхняя граница — от 30,0 до 61,2 Вт/м² для разных населенных пунктов. При этих условиях излучаемая антропогенная энергия (в ПДж) с административной территории равна: 8,29–20,7 для Сургута; 9,57–23,6 для Якутска; 7,37–15,4 для Архангельска; 5,16–11,6 для Мурманска; 2,99–9,09 для Норильска; 1,29–4,80 для Воркуты, Апатитов и Салехарда; 0,961–1,92 для Нарьян-Мара; 0,537–1,42 для Дудинки; 0,247–0,681 для Тикси и Диксона. Полученные результаты согласуются с количеством энергии, отпускаемой теплогенерирующими компаниями.

Плотность антропогенного потока тепла вниз к подстилающей поверхности с административной и урбанизированной территорий при $t_{НАР} = t_{OT}$ составляет соответственно 0,04–1,19 и 1,20–2,96 Вт/м².

Температура воздуха внутри зданий, особенно жилых, зачастую выше 20 °С, предусмотренных ГОСТ 30494-2011, поэтому реальное значение АПТ может быть выше рассчитанного.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

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».

Competing interests. No conflict of interests

Funding. The study was carried out with the support of the most important innovative project of state importance (VIPGP) “Unified national system for the monitoring of climatically active substances” (RF Government Order No. 3240-r dated October 29, 2022) within the framework of the R&D “Expanding 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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Будыко М.И. *Изменения климата*. Л.: Гидрометеониздат; 1974. 280 с.
2. Van Deelen G. Another hot Arctic year indicates a new climate regime. *Eos*. 2024;105. <https://doi.org/10.1029/2024EO240566>
3. Allen L., Lindberg F., Grimmond C.S.B. Global city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *International Journal of Climatology*. 2011;31(13):1990–2005.
4. Li D., Wang L., Liao W., Sun T., Katul G., BouZeid E., Marong B. Persistent urban heat. *Science Advances*. 2024;10(15): ead7398. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ad7398>
5. Пененко В.В., Алоян А.Е. *Модели и методы для задач охраны окружающей среды*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1985. 255 с.
6. Гинзбург А.С., Евсиков И.А., Фролькис В.А. Зависимость антропогенного потока тепла от температуры воздуха (на примере Санкт-Петербурга). *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2021;57(5):526–538. <https://doi.org/10.31857/S0002351521050060>

- Ginzburg, 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;57(5):461–471. <https://doi.org/10.1134/S0001433821050066>
7. Гинзбург А.С., Белова И.Н., Расплетина Н.В. Антропогенные потоки тепла в городских агломерациях. *Доклады АН*. 2011;439(2):256–259.
Ginzburg, A.S.; Belova, I.N.; Raspletina, N.V. Anthropogenic heat flows in urban agglomerations. *Doklady Akademii nauk*. 2011;439(2):256–259. (In Russ.).
 8. Makar P. A., Gravel S., Chirkov V., Strawbridge K.B., Froude F., Arnold J., Brook J. Heat flux, urban properties, and regional weather. *Atmospheric Environment*. 2006;40(15):2750–2766. <https://doi:10.1016/j.atmosenv.2005.11.061>
 9. Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology*. 2005;25(10):1405–1419. <https://doi:10.1002/joc.1198>
 10. Варенцов М.И., Грищенко М.Ю., Константинов П.И. Сопоставление наземных и космических разномасштабных температурных данных на примере городов Российской Арктики для зимних условий. *Исследование Земли из космоса*. 2021;2:64–76. <https://doi.org/10.31857/S0205961421020093>
Varentsov M.I., Grischenko M.Yu., Konstantinov P.I. Comparison between in situ and satellite multiscale temperature data for Russian arctic cities for winter season. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2021;2:64–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0205961421020093>
 11. Тарасова М.А. Варенцов М.И., Степаненко В.М. Параметризации взаимодействия атмосферы с городской поверхностью: обзор и перспективы развития. *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2023;59(2):127–148. <https://doi.org/10.31857/S0002351523020062>
Tarasova M.A., Varentsov M.I., Stepanenko V.M. Parameterization of interaction between the atmosphere and the urban surface: current state and Prospects. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023;59(2):111–130. <https://doi.org/10.1134/S0001433823020068>
 12. 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;178(2):249–281. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00569-y>
 13. Фролькис В.А. Евсиков И.А. Гинзбург А.С. Моделирование антропогенного потока тепла в течение отопительного периода в крупных городах России. *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2024;60(4):470–484. <https://doi.org/10.31857/S0002351524040051>
Frolkis V.A., Evsikov I.A., Ginzburg, A.S. Modeling anthropogenic heat flux during the heating season in large cities of the Russian Federation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024;60(4):407–420. <https://doi.org/10.1134/S0001433824700361>
 14. Фролькис В.А., Евсиков И.А. Оценка антропогенного потока тепла в течение отопительного периода в городах Российской Федерации с населением не менее полумиллиона человек. *Труды Главной геофизической обсерватории им А.И. Воейкова*. 2024;613:76–133.
Frolkis V.A., Evsikov I.A. Estimation of anthropogenic heat flux during the heating period in cities of the Russian Federation with a population of at least half a million. *Proceedings of the GGO*. 2024;613:76–133. (In Russ.).
 15. 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;177:105996. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105996>
 16. Евсиков И. А. Информационные технологии для расчета антропогенного потока тепла в условиях городской застройки. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2024;22(2):20–32. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2024-22-2-20-32>

- Evsikov I. A. Information technologies for calculating anthropogenic heat flux in urban areas. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2024;22(2):20–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2024-22-2-20-32>
17. Фролов К.А. Теплопотребление коттеджа в зависимости от его объемно–планировочных параметров. *Надежность и безопасность энергетики*. 2009;4(7):44–45.
Frolov K.A. Heat consumption of a cottage depending on its spatial planning parameters. *Reliability and safety of energy*. 2009;4(7):44–45. (In Russ.).
18. Подкопаева Е.В., Шехватова А.Н., Семенова Э.Е. Исследование ограждающих конструкций общественных зданий. *Инженерные системы и сооружения*. 2020;3–4(41–42):6–11.
Podkopaeva E.V., Shekhvatova A.N., Semenova E.E. Study of the enclosing structures of public buildings. *Engineering systems and structures*. 2020; № 3–4(41–42):6–11. (In Russ.).
19. Белан Б.Д., Пельмский О.А., Ужегова Н.В. Исследование антропогенной составляющей теплового баланса горда. *Оптика атмосферы и океана*. 2009;22(6):558–561.
Belan B.D., Pelymskii O.A., Uzhegova N.V. Study of the anthropogenic component of urban heat balance. *Optica Atmosfery i Okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*. 2009;22(4):441–445.
20. Dudorova N.V., Belan B.D. The energy model of urban heat island. *Atmosphere*. 2022;13(457). <https://doi.org/10.3390/atmos13030457>