

Теплопотери зданий и формирование подземного городского острова тепла

Д. Ю. Демежко, Б. Д. Хацкевич, Н. Р. Факаева, А. А. Горностаева, А. Н. Антипин

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, e-mail: ddem54@inbox.ru

Поступила в редакцию 01.12.2024 г., принята к печати 09.01.2025 г.

Объект исследования. Подземная температурная аномалия, создаваемая типовым офисным зданием. **Цель исследования.** Экспериментально и теоретически изучить кондуктивные тепловые потери здания, в том числе в подземную среду. Оценить морфологию и эволюцию подземной температурной аномалии, количество избыточного тепла, поступившего в недра. Оценить экономическое значение и экологические следствия температурной аномалии. **Материалы и методы.** Экспериментальные данные получены в ходе мониторинга температур и тепловых потоков на внутренних и внешних поверхностях главных конструктивных элементов здания Института геофизики УрО РАН в Екатеринбурге. На их основании рассчитаны сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, годовые колебания тепловых потоков и годовые тепловые потери. Численное моделирование использовалось для описания размеров, интенсивности и эволюции подземной температурной аномалии. **Результаты.** Основную часть тепла (83%) здание теряет через внешние конструктивные элементы – стены, окна, крышу – и лишь 17% – через стены и пол подвала. Суммарные потери за 40 лет эксплуатации здания составляют 133 ТДж и определяются низкими теплоизоляционными свойствами конструктивных элементов. По данным моделирования направленные в грунт потоки тепла сформировали подземную температурную аномалию, к настоящему времени распространившуюся на 15 м в стороны от здания и на 40 м в глубину (по изоаномале 2 К). Избыточное тепло, сохранившееся в недрах за 40 лет, составило 3.2 ТДж, или 2.4% от суммарных кондуктивных теплопотерь. **Выводы.** Утечки тепла из зданий играют ключевую роль в формировании подземного городского острова тепла, в 36 раз превышая климатический вклад, обусловленный глобальным потеплением. При этом экономическое значение накопленной в подземной среде тепловой энергии невелико, а экологические следствия потепления недр несущественны.

Ключевые слова: городской остров тепла, здание, тепловые потери, подземная температурная аномалия, сопротивление теплопередаче, тепловой поток, теплосодержание

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10018 (<https://rscf.ru/project/22-77-10018/>)

Heat losses from buildings and formation of underground urban heat islands

Dmitry Yu. Demezhko, Bogdan D. Khatskevich, Nelly R. Fakaeva, Anastasiya A. Gornostaeva, Alexander N. Antipin

Institute of Geophysics, UB RAS, 100 Amundsen st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: ddem54@inbox.ru

Received 01.12.2024, accepted 09.01.2025

Research subject. The underground temperature anomaly created by a typical office building. **Aim.** To conduct theoretical and experimental studies of conductive heat losses from a building, including those to the underground environment. To assess the morphology and evolution of the underground temperature anomaly and additional heat storage in the subsurface. To evaluate the economic significance and environmental consequences of such a temperature anomaly. **Materials and methods.** Experimental data were collected by monitoring temperatures and heat fluxes along the internal and external surfaces of the main structural elements of the building of the Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg, Russia). These data were used to calculate the resistance to heat transfer (reciprocal of thermal transmittance) of the building structural elements, annual fluctuations in heat fluxes, and annual heat losses. Numerical simulation was used to describe the distribution, intensity, and evolution of the underground temperature anomaly. **Results.** The building loses 83% of its heat through external surfaces (walls, windows, roof), with only 17% being lost through the basement walls and floor. Over 40 years of the building operation, the total losses amount to

Для цитирования: Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Факаева Н.Р., Горностаева А.А., Антипин А.Н. (2025) Теплопотери зданий и формирование подземного городского острова тепла. *Литосфера*, **25**(5), 1201-1215. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-5-1201-1215>. EDN: IQPYYL

For citation: Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Fakaeva N.R., Gornostaeva A.A., Antipin A.N. (2025) Heat losses from buildings and formation of underground urban heat islands. *Lithosphere (Russia)*, **25**(5), 1201-1215. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-5-1201-1215>. EDN: IQPYYL

133 TJ and are determined by the low thermal insulation properties of its structural materials. According to the simulation results, the heat fluxes that penetrated the ground have formed an underground temperature anomaly, which has thus far spread to 15 m to the sides of the building and to 40 m into the depth (by the 2 K isoanomaly). The excess heat storage retained in the subsurface during the period of 40 years amounts to 3.2 TJ or 2.4% of the total conductive heat loss. *Conclusions.* Heat losses from buildings play a key role in the formation of underground urban heat islands, exceeding the climatic contribution of global warming by 36 times. At the same time, the economic importance of the thermal energy accumulated in the underground environment is low, and the environmental consequences of warming of the subsurface are negligible.

Keywords: urban heat island, building, heat losses, underground temperature anomaly, resistance to heat transfer, heat flux, heat storage

Funding information

The work was carried out with the financial support of the Russian Scientific Foundation (project No. 22-77-10018, <https://rscf.ru/project/22-77-10018/>)

ВВЕДЕНИЕ

Процессы урбанизации, активно протекающие во всем мире, привели к тому, что половина населения Земли сейчас проживает в городах, а к 2050 г. доля городского населения достигнет 70% (Attard et al., 2016). В России темпы урбанизации выше среднемировых. Уже в конце 80-х гг. прошлого века в городах проживало три четверти россиян. Затем увеличение городского населения стабилизировалось (по данным переписи 2010 г. (Анохин и др., 2014)). Вследствие концентрации людей, энергии и радикальных преобразований ландшафтов территория города представляет собой аномалии практически всех известных геофизических полей – электромагнитного, акустического, гравитационного, теплового, полей радиогенных газов и др. (Оке, 1973; Chandler, 1976; Коридалин и др., 1985; Адушкин и др., 1995; Castiello et al., 2010; Шулейкин, 2014; Lokoshchenko, 2014; Спивак и др., 2016).

Тепловая аномалия в приземной атмосфере известна как явление городского острова тепла (ГОТ). Этот термин имеет исключительно негативный смысл: с повышенными температурами городского воздуха связывают формирование локальных систем циркуляции атмосферы, препятствующих ее очищению; снижение комфортности городов и риски для здоровья населения, особенно в периоды прохождения волн аномальной жары; негативное влияние на состояние окружающей среды. Библиография исследований, посвященных ГОТ, весьма обширна (подробные обзоры приведены в работах (Tzavali et al., 2015; Mohajerani et al., 2017; Stewart et al., 2021; Kim, Brown, 2021)).

Значительно менее изучена тепловая аномалия в подземной среде города (Taniguchi, 1993; Ferguson,

Woodbury, 2004; Dědeček et al., 2012; Schweighofer et al., 2021). Основными причинами повышения температуры подземной среды называют глобальное потепление приземного воздуха, усиленное в городах эффектом городского острова тепла, пониженные альbedo и испарение с городских поверхностей, но наиболее интенсивные аномалии подземных температур в городах с умеренным и холодным климатом связаны с утечками тепла из подвалов домов и тепловых сетей (Ferguson, Woodbury, 2004; Menberg et al., 2013; Benz et al., 2015; Bayer et al., 2016; Loria et al., 2022). Например, в Милане 85% тепла поступает в подземную среду из зданий (Prevati et al., 2022). По данным температурного мониторинга в скважинах Екатеринбурга аномалии, связанные с утечками тепла из подвалов, достигают 7 К на глубине 10 м и 3.5 К на 50 м, но, вероятно, распространяются и ниже (Горностаева и др., 2024).

Вследствие слабой изученности подземного городского острова тепла остается неясной и экологическая значимость этого феномена. Отмечается, что повышенные температуры подземной среды приводят к изменениям химического и биологического состава подземных вод (Белоусова, Проскурина, 2008; Hähnlein et al., 2013; Chu, Loria, 2024). Тем не менее ряд исследователей полагает, что часть утерянного зданием и накопленного в недрах тепла не создает заметной экологической нагрузки, но может быть возвращена в экономический оборот, например, с помощью тепловых насосов, эффективность работы которых возрастает с повышением температуры в недрах (Benz et al., 2015; Luo, Asproudi, 2015; Bayer et al., 2019; Hemmerle et al., 2022). На наш взгляд, для оценки экологического и экономического значения подземных

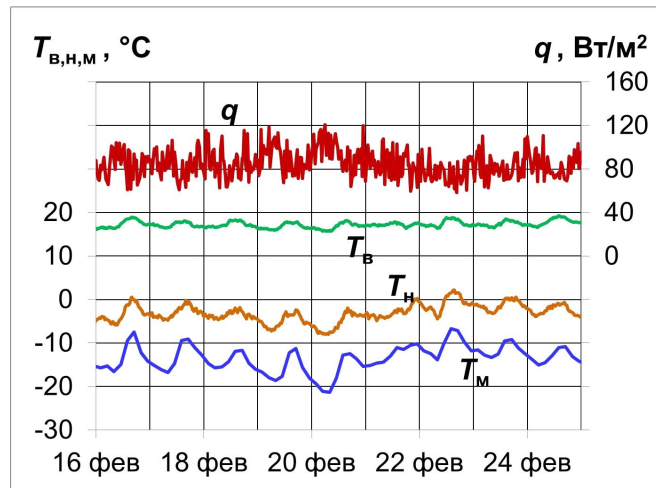


Рис. 1. Здание Института геофизики УрО РАН и фрагмент записи теплового потока (q), температур на внутренней ($T_{\text{в}}$), наружной ($T_{\text{н}}$) поверхностях окна и температуры приземного воздуха по данным метеостанции Екатеринбурга ($T_{\text{м}}$).

Fig. 1. The building of the Institute of Geophysics UB RAS and a sample of the record of heat flow (q), temperatures on the inner ($T_{\text{в}}$) and outer ($T_{\text{н}}$) surfaces of the window, and air temperature recorded at the Yekaterinburg weather station ($T_{\text{м}}$).

городских аномалий было бы полезно оперировать не только абсолютными цифрами – пространственными тепловыми характеристиками, но и относительными – в сравнении с потреблением энергии и общими потерями тепла, связанными с эксплуатацией зданий.

В настоящей статье на примере здания Института геофизики УрО РАН в Екатеринбурге исследуются тепловые потоки и потери тепла через его конструктивные элементы, динамика накопления тепла в недрах, оцениваются интенсивность и размеры температурной аномалии, ее экологическое и энергетическое значения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом изучения тепловых потерь и формирования подземной тепловой аномалии был выбран главный корпус здания Института геофизики (ИГФ) УрО РАН (Екатеринбург, ул. Амундсена, 100). Четырехэтажное монолитно-кирпичное здание ИГФ было построено в 1980 г.

Годовой ход кондуктивных тепловых потерь через элементы здания рассчитывался по данным измерений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и годовому ходу температуры наружного воздуха (метеоданные). Для оценки сопротивления теплопередаче использовался двухпараметрический измеритель теплофизических величин “Теплограф” (www.interpribor.ru/measuring-heat-flux-of-teplograf), включающий два темпера-

турных датчика, датчик теплового потока и регистратор. Согласно СНиП “Тепловая защита зданий 23-02-2003”, температурные датчики располагались на внутренней и внешней поверхностях ограждающей конструкции, датчик теплового потока – на внутренней поверхности. Измерения проводились в течение нескольких недель в холодное время года, когда тепловой поток из здания максимален. Сопротивление теплопередаче R рассчитывалось по формуле:

$$R = (T_{\text{в}}^* - T_{\text{н}}^*)/q^*, \quad (1)$$

где $T_{\text{в}}^*$, $T_{\text{н}}^*$ – средние температуры на внутренней и внешней поверхностях ограждающей конструкции; q^* – средний тепловой поток через внутреннюю поверхность. На рис. 1 приведены колебания температур и теплового потока на окне с алюминиевыми рамами, а также температуры приземного воздуха по данным метеостанции Екатеринбурга. Рассчитанные по формуле (1) коэффициенты сопротивления теплопередаче приведены в табл. 1. Для сравнения также приведены нормативные значения сопротивления теплопередаче, действующие в России и Финляндии. Отметим, что измеренные значения R не соответствуют российским нормам практически для всех элементов здания ИГФ. Еще более жесткие требования к теплозащите приняты в Финляндии.

Чтобы реконструировать годовой ход теплового потока, зададим постоянными температуру внутри помещения ($T_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$) и сопротивления тепло-

Таблица 1. Сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций ИГФ и минимальные требования к уровню тепловой защиты в России и Финляндии**Table 1.** The coefficient of a resistance to heat transfer (reciprocal of the thermal transmittance) of elements of the IGF building's envelope and minimum requirements for thermal protection in Russia and Finland

Поверхность (ограждающая конструкция)	R , м ² К/Вт	R , м ² К/Вт (Россия)	R , м ² К/Вт (Финляндия)
Крыша (совмещенное покрытие)	1.64	2.0* 3.0**	11.1
Несущая стена (бетон)	1.42	1.6* 2.7**	5.88
Стена под окном (кирпич)	0.79	1.6* 2.7**	5.88
Старое окно (двойная алюминиевая рама)	0.22	0.32* 0.45**	1.0
Новое окно (двойной стеклопакет – пластик)	0.37		

*Производственные здания с сухим и нормальным режимами.

**Общественные, административные и бытовые производственные здания с влажным или мокрым режимом.

Примечание. Приведены российские нормы согласно СП 50.13330.2012 “Тепловая защита зданий” для ГСОП (градусо-сутки отопительного сезона) $= (T_b - T_m)t_{от} = 5000^\circ\text{C}$ сутки, где $T_m = -3.5^\circ\text{C}$, $t_{от} = 212$ сут – средняя температура наружного воздуха и продолжительность отопительного сезона, $T_b = 20^\circ\text{C}$ – температура воздуха внутри помещения. Финские нормы – согласно стандарту National Building Code of Finland, Part D3 (Ватин и др., 2012).

*Industrial buildings with dry and normal conditions.

**Public, administrative and domestic industrial buildings with wet or damp conditions.

Note. Russian standards are given according to SP 50.13330.2012 “Thermal protection of buildings” for DDHS (degree-day of the heating season) $= (T_a - T_m)t_{hs} = 5000^\circ\text{C} \times \text{day}$, where $T_m = -3.5^\circ\text{C}$, $t_{hs} = 212$ days are the average outdoor air temperature and the duration of the heating season, $T_a = 20^\circ\text{C}$ is the indoor air temperature. Finnish standards – according to the National Building Code of Finland, Part D3 (Vatin et al., 2012).

передаче (согласно табл. 1). Поскольку температура на внешней поверхности ограждающей конструкции T_n из-за присутствия пограничного слоя несколько отличается от температуры наружного воздуха T_m (см. рис. 1), для ее оценки по метеоданным используем соотношение:

$$T_n = T_m + k(T_b - T_m), \quad (2)$$

где поправочный коэффициент k для каждого элемента здания рассчитывается по средним температурам за период измерений:

$$k = (\bar{T}_n - \bar{T}_m) / (\bar{T}_b - \bar{T}_m). \quad (3)$$

Тепловые потоки оценим по формуле:

$$q = (T_b - T_n) / R. \quad (4)$$

В табл. 2 приведены среднемесячные значения теплового потока через различные элементы здания ИГФ, реконструированные по метеоданным о температуре приземного воздуха в 2023 г. Рис. 2 иллюстрирует данные табл. 2. Через окна старой конструкции наблюдается максимальный тепловой поток (85 Вт/м^2 в среднем за отопительный сезон, октябрь – апрель, в среднем за год 54 Вт/м^2). Современный стеклопакет позволяет снизить потери тепла на 40%. Минимальный тепловой поток (2.3 Вт/м^2) направлен через пол подвала в грунт. В июле, когда среднемесячная температура наружного воздуха превышала принятые для помеще-

ний 20°C , тепловой поток непродолжительное время был направлен внутрь помещений.

Кондуктивные потери тепла через все элементы здания за некоторый период t равны:

$$P = t \sum q_i S_i, \quad (5)$$

где q_i и S_i – средний за период поток и площадь i -го элемента. Годовые потери составляют $P = 2.76 \text{ ТДж}$ и формируются в основном в отопительный период с октября по май – 80% (табл. 3). Через стены и окна всех типов теряется примерно равное количество тепла – 41.4 и 41.9% соответственно, хотя окна занимают лишь 8.5% площади внешних поверхностей. Замена старых окон на новые обеспечила бы годовую экономию 0.38 ТДж, или 91 Гкал (220 тыс. р. в ценах 2024 г.). Тепловой поток через стены подвала измерялся аппаратурой “Теплограф” в течение двух недель в начале отопительного сезона (октябре). Среднее значение теплового потока в верхней части стены (0.5 м от дневной поверхности) составило 23.3 Вт/м^2 , в нижней (2.5 м от дневной поверхности) – 11.9 Вт/м^2 . Тепловой поток через пол подвала оказался ниже предела чувствительности датчиков “Теплографа”. Он был рассчитан по данным мониторинга температур в грунте на различных глубинах и результатам измерений теплопроводности грунта и оказался равным 2.3 Вт/м^2 . Эти оценки лишь ориентировочно характеризуют среднегодовой поток и не могут быть использованы для расчета годовых теплопотерь.

Таблица 2. Среднемесячные значения тепловых потоков через внешние ограждающие конструкции здания
Table 2. The mean monthly heat fluxes through external surfaces of the building

Месяц	Температура наружного воздуха T_m , °C	Тепловой поток q , Вт/м ²				
		Крыша $k = 0.23$	Несущая стена $k = 0.23$	Стена под окном $k = 0.14$	Старое окно $k = 0.31$	Новое окно $k = 0.20$
Январь	–11.3	14.6	19.6	34.2	113.3	68.3
Февраль	–9.3	13.7	18.3	32.0	106.0	63.9
Март	0.3	9.2	12.3	21.5	71.3	43.0
Апрель	6.7	6.2	8.3	14.5	48.1	29.0
Май	16.4	1.7	2.2	3.9	13.0	7.9
Июнь	16.2	1.8	2.4	4.1	13.8	8.3
Июль	21.7	–0.8	–1.1	–1.9	–6.2	–3.7
Август	17.8	1.0	1.4	2.4	8.0	4.8
Сентябрь	13.5	3.0	4.1	7.1	23.5	14.2
Октябрь	4.4	7.3	9.7	17.0	56.5	34.0
Ноябрь	–2.1	10.3	13.8	24.1	80.0	48.2
Декабрь	–13.2	15.5	20.7	36.2	120.2	72.5
Среднее за год	5.1	7.0	9.3	16.3	53.9	32.5
Среднее за отопительный период	–3.5	11.0	14.7	25.6	85.1	51.3

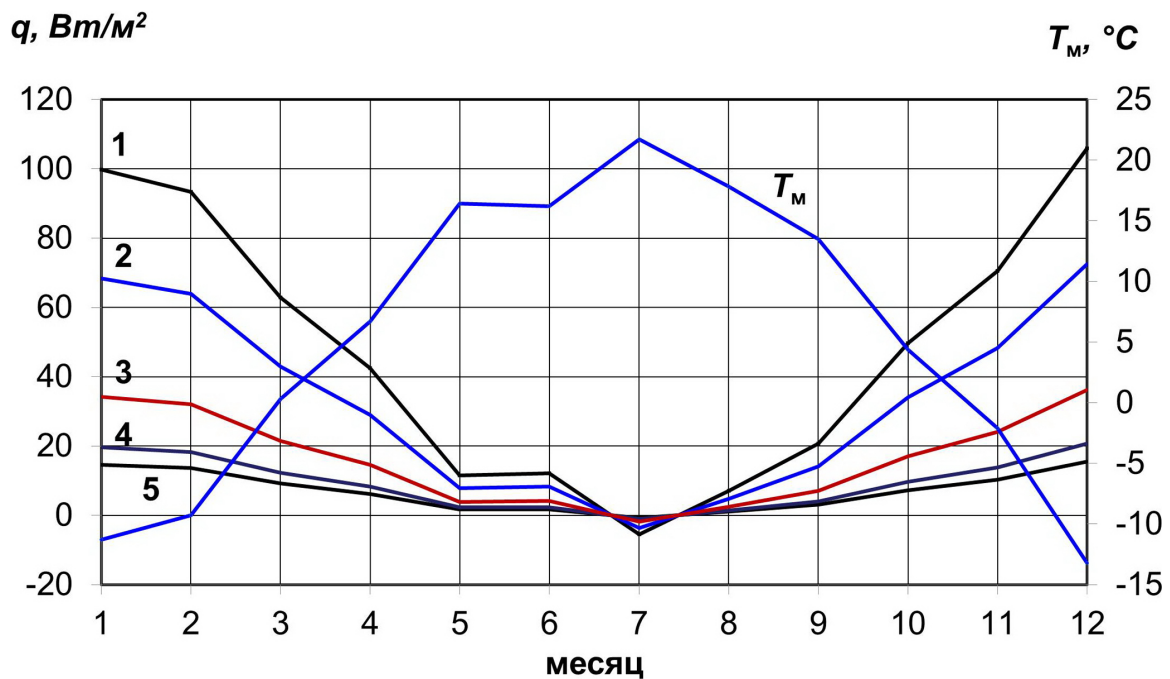


Рис. 2. Среднемесячные тепловые потоки через внешние ограждающие конструкции здания Института геофизики и среднемесячные температуры приземного воздуха по метеоданным (T_m).

1 – старое окно, 2 – новое окно, 3 – стена под окном, 4 – несущая стена, 5 – крыша.

Fig. 2. The mean monthly heat fluxes through the external surfaces of the building and T_m – the mean monthly surface air temperature according to meteorological data.

1 – old window, 2 – new window, 3 – wall under the window, 4 – load-bearing wall, 5 – roof.

Таблица 3. Годовые потери тепла через внешние ограждающие конструкции здания**Table 3.** Annual heat losses through the external building's envelope

Показатель	Крыша	Несущая стена	Стена под окном	Старое окно	Новое окно	Всего
Площадь, м ²	2072	3558	195	581	165	6571
Площадь, %	31.5	54.1	3.0	8.8	2.5	100
Ср. годовой поток, Вт/м ²	7.0	9.3	16.3	53.9	32.5	
Потери тепла за год, ТДж	0.46	1.04	0.10	0.99	0.17	2.76
То же, %	16.6	37.8	3.6	35.8	6.1	100
Потери тепла за отопительный сезон, ТДж	0.42	0.96	0.09	0.91	0.16	2.54
То же, %	16.5	37.8	3.5	35.8	6.3	100

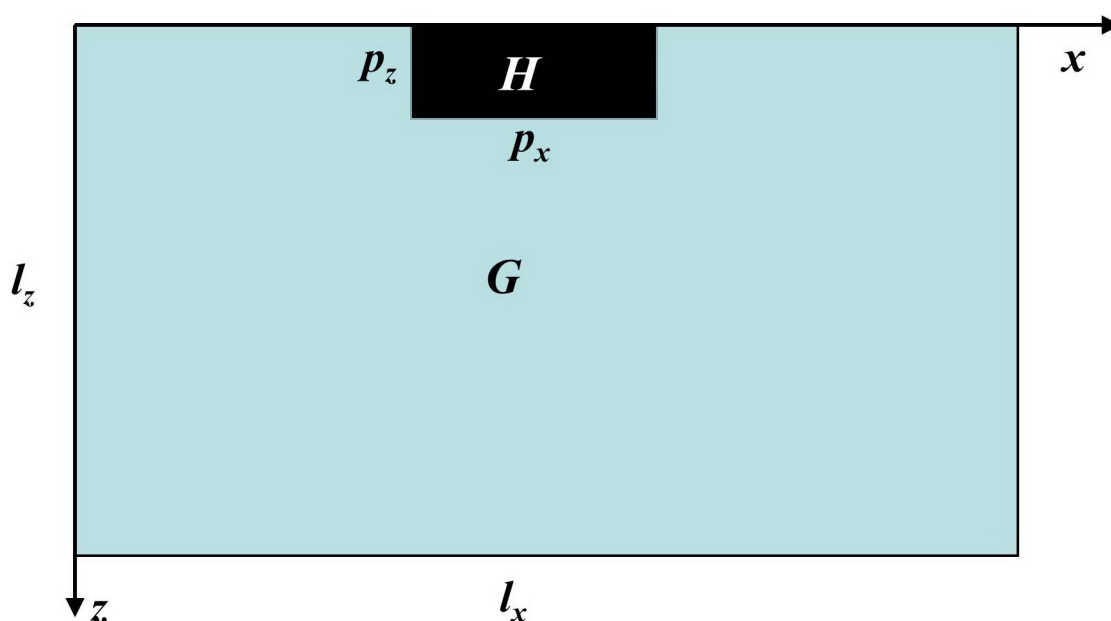
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Оценим тепловые потоки и динамику формирования подземной температурной аномалии в результате тепловых утечек из подвала с помощью численного моделирования. Поскольку длина здания Института намного больше его ширины, удобно рассматривать двумерное уравнение теплопроводности (вкrest здания):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \quad t > 0, \quad (6)$$

где $U = U(x, z, t)$ – аномалия температуры, t – время, a – температуропроводность. Для численного

решения задачи примем следующие значения параметров: размеры области моделирования G составляют $l_x = 220$ м, $l_z = 200$ м (рис. 3). Черный прямоугольник H с размерами $p_x = 19$ м, $p_z = 3$ м представляет поперечное сечение подвала. Температуропроводность пород $a = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Пусть начальная температурная аномалия в области моделирования $U_0(x, z) = 0$. В момент $t = 0$ в пределах подвала H возникает температурная аномалия $U_H(x, z) = 12.5$ К, которая затем поддерживается в течение неограниченного периода. Выбранное значение возникшей аномалии определяется ненарушенной среднегодовой температурой на глубинах 0–50 м в Екатеринбурге и его окрестно-

**Рис. 3.** Геометрия моделирования.**Fig. 3.** Modeling geometry.

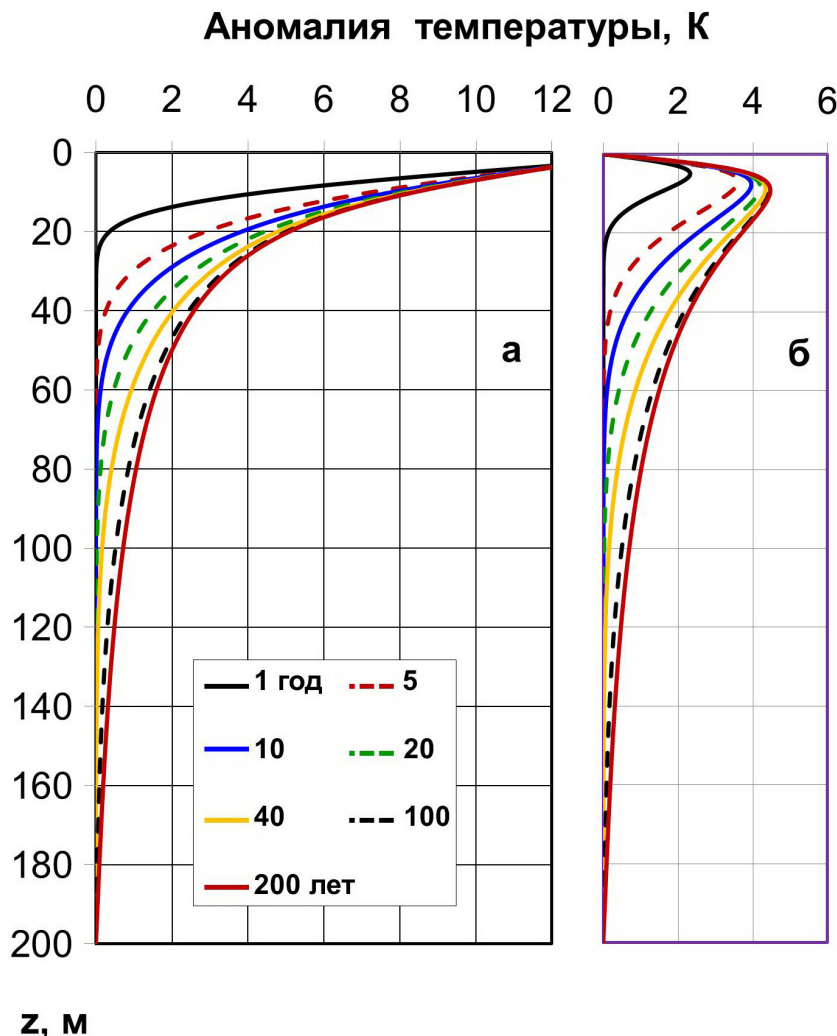


Рис. 4. Вертикальные распределения температурной аномалии под центральной частью здания (а) и в 5 м от внешней стены (б) в зависимости от срока эксплуатации здания.

Шифр кривых – годы.

Fig. 4. Vertical profiles of temperature anomaly under the central part of the building (a) and 5 m far from the outer wall (б) depending on the building's service life.

Curve code – years.

стях, равной 5.5°C (Демежко и др., 2024), и принятой среднегодовой температурой в подвале 18°C . На границах области моделирования G при этом сохраняется нулевая аномалия.

Результаты расчетов термического состояния подземной среды на равномерной сетке 0.5×0.5 м для различных моментов после возникновения аномалии представлены на рис. 4, 5. Вертикальные распределения температурной аномалии под центральной частью здания (см. рис. 4а) и в 5 м от внешней стены (см. рис. 4б) существенно различаются. Со временем аномалия все глубже проникает в грунт, но примерно через 100 лет после ее воз-

никновения она становится практически стационарной – за следующие 100 лет температура нигде уже не изменится более чем на 0.2 К. Дальнейшее распространение прекращается. Уже через 40 лет (возраст здания ИГФ) аномалия отличается от стационарной не более чем на 0.5 К. Под зданием аномалия максимальна в верхней части и быстро уменьшается с глубиной. На расстоянии 5 м от здания через 1 год максимальное значение аномалии 2.3 К достигается на глубине 5 м, а в стационарном режиме максимум 4.5 К – на глубине 9 м. Пространственное распределение аномалии вкост здания иллюстрирует рис. 5.

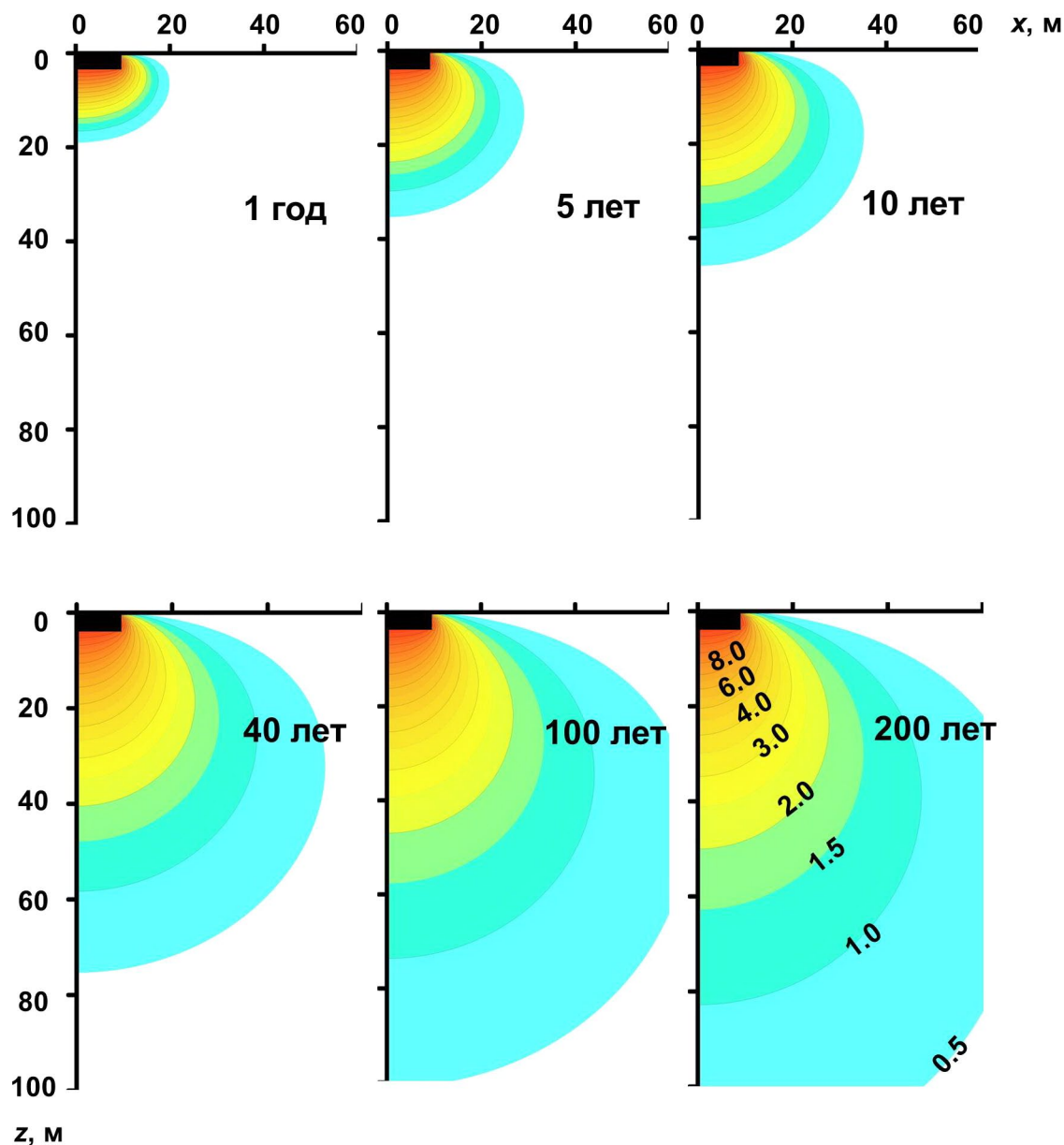


Рис. 5. Распределение аномальных температур (шифр кривых) в плоскости, расположенной вкост простирания здания.

Вертикальные оси проходят через центр подвала (черный прямоугольник).

Fig. 5. The distribution of anomalous temperatures (curve code) in a plane located across the strike of the building.

The vertical axes pass through the center of the basement (black rectangle).

Полученные данные позволяют судить о том, как со временем менялись потоки тепла, направленные в грунт, и избыточное теплосодержание грунта. Средний тепловой поток $\bar{q}$ (Вт/м²) через пол и стены рассчитывается согласно закону Фурье $\bar{q} = -\lambda \bar{g} \Delta T$, где $\bar{g} \Delta T$ – среднее значение температурного градиента, λ – теплопроводность грунта, принятая равной 2.2 Вт/(м К), а мощность

тепловых потерь Q (Вт): $Q = qS$, где S – площадь пола (2072 м²) и стен (765 м²). Тепловой поток, бесконечный по определению в момент $t = 0$, уже через год равен 3.7 Вт/м² (через пол) и 21 Вт/м² (через стены), через 40 лет –2.3 и 20.6 Вт/м² соответственно (табл. 4). Отметим, что модельная оценка теплового потока для пола подвала в точности совпадает с полученной экспериментально, а модельное

Таблица 4. Изменения тепловых потоков и мощности теплопотерь через подвал

Table 4. Changes in heat flux and a heat loss power through the basement

Срок эксплуатации, лет		1	5	10	20	40	100	200
Среднее годовое значение теплового потока $\bar{q}$, Вт/м ²	Через пол	3.74	2.65	2.47	2.36	2.31	2.28	2.26
	Через стены	21.14	20.72	20.63	20.59	20.56	20.55	20.54
Мощность теплопотерь Q , кВт	Через пол ($S = 2072$ м ²)	7.76	5.49	5.11	4.89	4.78	4.71	4.69
	Через стены ($S = 765$ м ²)	16.17	15.84	15.78	15.75	15.73	15.72	15.71
	Пол и стены	23.93	21.34	20.89	20.64	20.51	20.42	20.40

значение потока через стены находится в пределах экспериментальных оценок в верхней и нижней частях стены (23.3–11.9 Вт/м²). Высокий тепловой поток через стены подвала, сопоставимый с потоками через внешние ограждающие конструкции здания (см. табл. 2), обеспечивается близостью земной поверхности с постоянной среднегодовой температурой. На рис. 6 представлены графики, иллюстрирующие изменения со временем утечек тепла через пол и стены подвала. Основные утечки происходят через стены. Уже через 10 лет эксплуатации здания утечки стабилизируются.

Выделенное в недра тепло частично накапливается в грунте, частично уходит в атмосферу через земную поверхность около здания. И хотя вы-

деление тепла из подвала уже через 10 лет стабилизируется, его накопление в недрах продолжается убывающими со временем темпами (см. рис. 6б). К настоящему времени (через 40 лет эксплуатации) накопилось 3.2 ТДж тепла, что составляет 14% от выделенного. В будущем эта доля будет уменьшаться и через 200 лет снизится до 4%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исследования и математическое моделирование показали, что большая часть энергии, потребляемой зданием, реализуется в виде утечек тепла через внешние поверхности и лишь часть тепла, уходящего через пол и стены

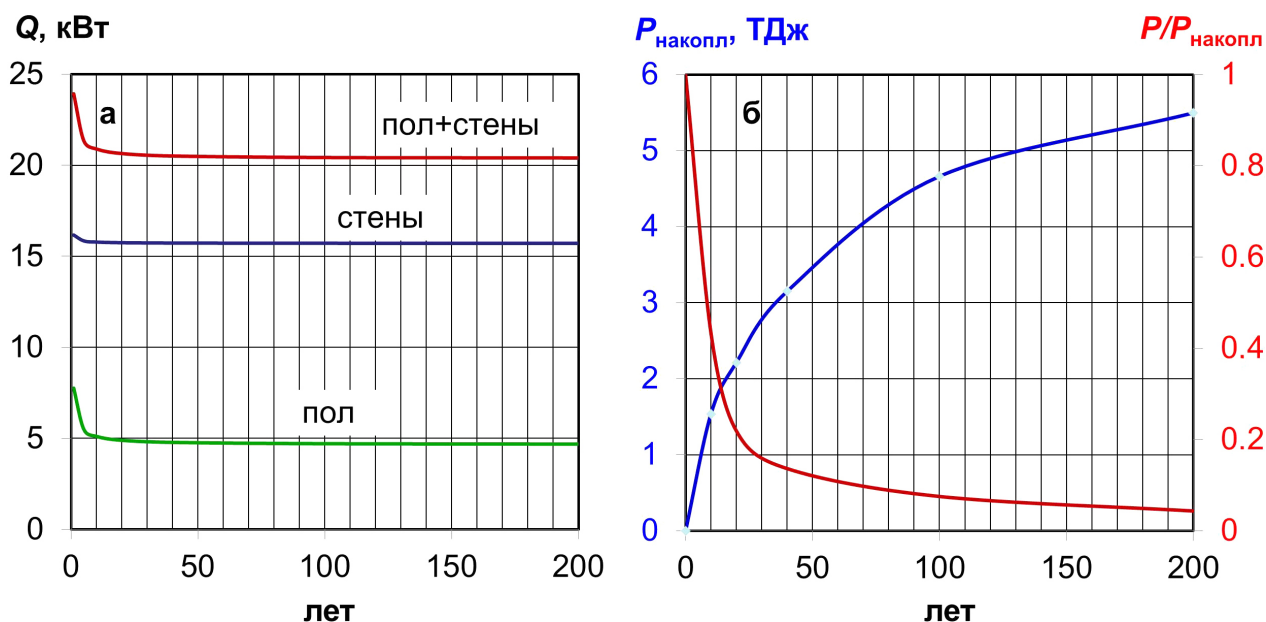


Рис. 6. Динамика изменений мощности теплопотерь через подвал (а) и накопления тепла в недрах (б) в абсолютных величинах (синяя кривая) и относительно теплопотерь (красная кривая).

Fig. 6. Dynamics of changes in the heat loss power through the basement (a) and heat storage in subsurface (b) in absolute values (blue curve) and relative to the heat loss (red curve).

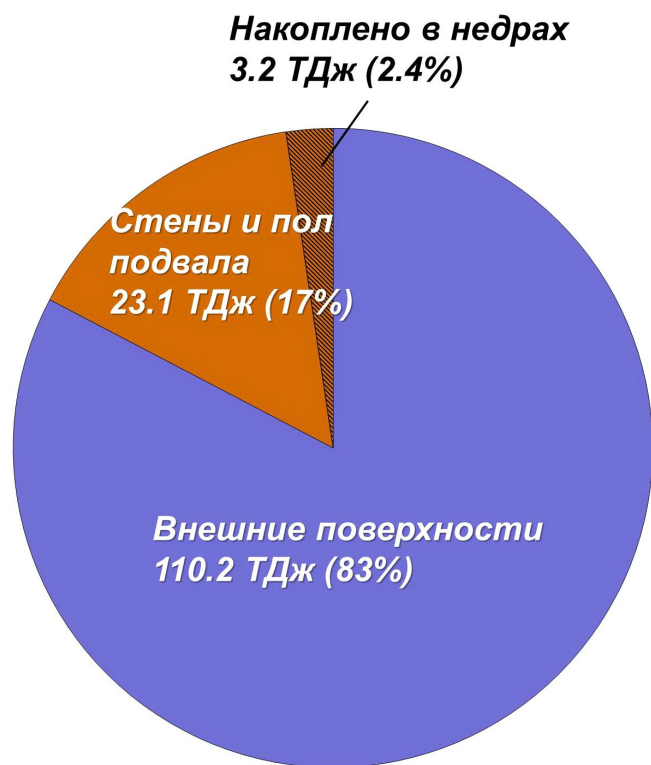


Рис. 7. Соотношения кондуктивных теплотерь за 40 лет через внешние поверхности здания, стены и пол подвала и доля накопленного в недрах избыточного тепла.

Fig. 7. Ratios of conductive heat losses over 40 years through the external surfaces of the building, walls and floor of the basement and the proportion of heat storage.

подвала, сохраняется в грунте, увеличивая теплосодержание (рис. 7). Основная часть выделенного в грунт тепла также возвращается в атмосферу через прилегающую к зданию территорию. В итоге через 40 лет эксплуатации здания лишь 2.4% тепла остается в недрах. Если рассчитывать долю сохранившегося в недрах тепла от потребленной зданием энергии, то она окажется еще ниже, поскольку в нашем анализе не учитывались конвективные теплотери, связанные с вентиляцией и утечками через открытые двери и окна. По данным (Smith et al., 2007; Tien et al., 2021), они составляют от 15 до 35% потребленной энергии. Тем не менее оценка 2.4% намного выше сделанной нами ранее для производственного ангара, не имеющего подвала, – 0.08% (Горностаева и др., 2024). Еще меньшая доля (0.03 % от потребленной энергии) накопилась за 100 лет под зданием кирпичного завода (г. Стюартби, Великобритания (Westaway et al., 2015)), также не имеющего подвала. Столь существенные различия для зданий с подвалами и без них уже отме-

чались (Benz et al., 2018; Visser et al., 2020): для городов, имеющих дома с подвалами (Берлин, Мюнхен, Кельн, Франкфурт, Дармштадт), тепловой поток в грунт выше, а подземная температурная аномалия более интенсивная, чем в городах, дома в которых традиционно строились без подвалов (Амстердам, Осака).

Незначительная доля сохраненного в недрах под зданиями избыточного тепла заставляет скептически относиться к экономической целесообразности его использования, например, с применением тепловых насосов, как это предлагает ряд исследователей (Zhu et al., 2010; Benz et al., 2015; Luo, Asproudi, 2015; Bayer et al., 2019; Hemmerle et al., 2022). Гораздо больший эффект могут обеспечить мероприятия по снижению энергопотребления зданий. В работе (Jung et al., 2018) было показано, что применение технологии с “почти нулевым потреблением энергии” (nZEB) позволяет экономить до 86% тепловой и 32% электроэнергии в Хельсинки, до 95 и 33% соответственно – в Лондоне, 92 и 34% – в Бухаресте.

Интересно также сопоставить количество избыточного тепла, накопленного под зданиями, с теплом, поступившим в недра города вследствие глобального потепления. Оценка удельного избыточного теплосодержания в результате глобального потепления, основанная на данных температурных измерений в скважине ВС-180, расположенной в 30 км от города, примерно равна $H_{гн} = 5 \cdot 10^7$ Дж/м² (Демежко и др., 2024). Она характеризует количество избыточного тепла, накопленного в столбе грунта с поперечным сечением 1 м² в интервале 0–200 м. Удельное избыточное теплосодержание в пределах всей аномалии под зданием ИГФ, отнесенное к единице площади под зданием, равно $H_T = 3.2 \cdot 10^{12}$ Дж/2072 м² = 179·10⁷ Дж/м², или в 36 раз выше. Если рассматривать не отдельное здание, а городской район в целом, то в зависимости от коэффициента застроенности K_z , удельное избыточное теплосодержание будет равно $H = H_T \cdot K_z + H_{гн}(1 - K_z)$. В центральных, плотно застроенных районах $K_z = 0.6$ и $H = 109 \cdot 10^7$ Дж/м², в районах с редкой застройкой $K_z = 0.2$ и $H = 40 \cdot 10^7$ Дж/м². Для сравнения, в Кёльне суммарное избыточное теплосодержание, связанное с городскими постройками и глобальным потеплением, в различных районах города оценивается меньшей величиной (2–22)·10⁷ Дж/м² (Bayer et al., 2016).

Одним из важных вопросов в исследованиях подземной аномалии тепла от зданий является оценка ее размеров и интенсивности. В публикации (Attard et al., 2016) определена граница зоны термического воздействия по изоаномале +0.5 К и показано, что объем такой зоны в 14–20 раз превышает размеры подземного сооружения, например, подвала. В работе (Ferguson, Woodbury, 2004) оценивается распространение 100-летней температур-

ной аномалии +2 К от подвала шириной 50 м на 50 м от здания по горизонтали и на 130 м в глубину. В нашем теоретическом примере к настоящему времени, через 40 лет эксплуатации, аномалия >2 К распространяется на 15 м в стороны от здания и на 40 м в глубину (по изоаномале 2 К). Через 100 лет эксплуатации прогнозируется незначительное ее дальнейшее распространение на 17 м в стороны и на 47 м в глубину.

Несмотря на различия в оценках, эти примеры указывают на согласованность между размерами здания и аномалии. Помимо кондуктивного теплопереноса на форму и интенсивность аномалии влияют течения подземных вод, особенно в городах, построенных на осадочных породах, в которых развиты водоносные горизонты с интенсивным течением (Attard et al., 2016; Benz et al., 2018; Bidarmaghz et al., 2020). В Екатеринбурге основным коллектором грунтовых вод являются зоны экзогенной трещиноватости палеозойских интрузивных, вулканогенных и метаморфических комплексов, формирующих ограниченные участки приповерхностного водосбора. Однако даже незначительная гидрогеологическая активность может повлиять на тепловую аномалию. Примером может служить сопоставление теоретического распределения температур с реальным профилем среднегодовых температур в скважине ИГФ-60, пробуренной в 25 м от здания института (рис. 8). К рассчитанной по описанной модели теоретической аномалии была добавлена фоновая, составляющая 5.5°C. Распределение среднегодовых температур по скважине соответствует невозмущенному тепловому режиму, наблюдаемому за пределами города и в лесопарковых зонах (Демежко и др., 2024), и не содержит аномального участка, прогнозируемого моделью. Очевидно, что в рассматриваемых условиях реальные размеры аномалии от здания меньше теоретических, и наиболее убедительное объяснение этому – влияние гидрогеологического фактора.

Экологические последствия теплового загрязнения могут проявляться изменениями химического и биологического состава подземных вод. Так, исследования влияния тепловых насосов на подземную среду показали, что связанные с их эксплуатацией изменения температуры в основном влияют на растворимость силикатов (Arning et al., 2006). Повышение температуры грунтовых вод способствует осаждению кальцита. Это, однако, не приводит к существенному уменьшению пористости и проницаемости, напротив, они несколько увеличиваются вследствие растворения полевого шпата. Авторы делают вывод, что эксплуатация приповерхностных геотермальных установок не вызывает неблагоприятных изменений в гидравлических свойствах изученных четвертичных водоносных горизонтов. Другим примером воздействия по-

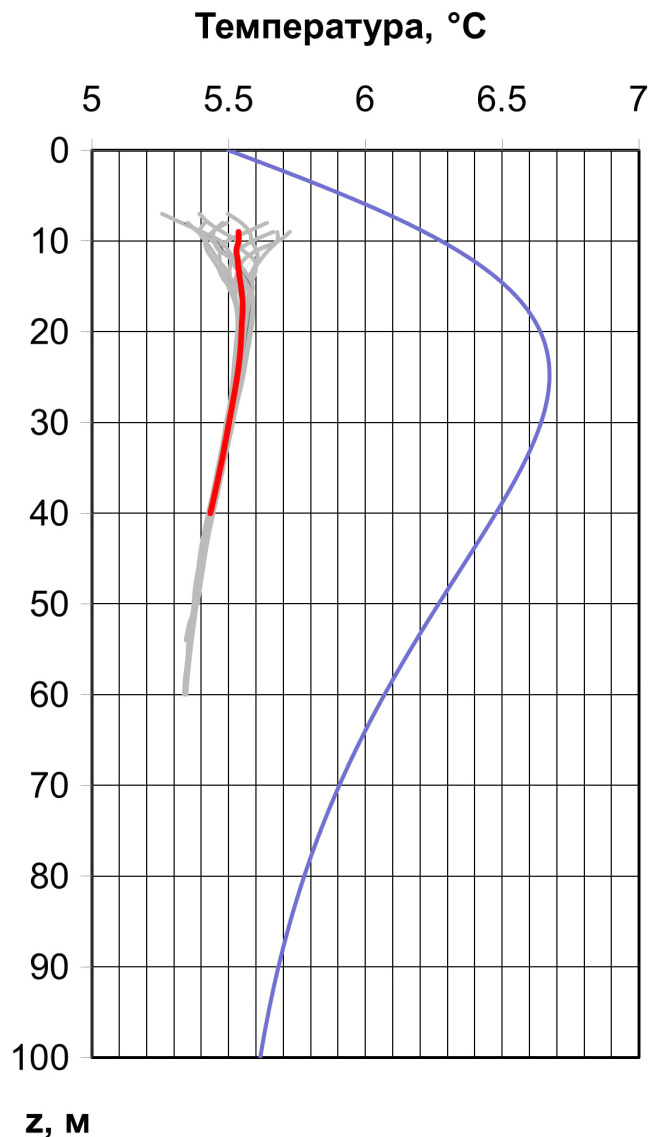


Рис. 8. Распределение сезонных (серые кривые) и среднегодовых (красная кривая) температур по скважине ИГФ-60 в сравнении с теоретическим распределением (синяя кривая).

Fig. 8. Distribution of seasonal (gray curves) and the mean annual (red curve) temperatures in the borehole IGF-60 in comparison to the modelled temperature distribution (blue curve).

вышенных температур на химический состав воды является разложение органических соединений с выделением диоксида углерода (Brons et al., 1991). Но и этот процесс становится заметным лишь при температурах выше 45°C. В работе (Brielmann et al., 2009) исследовано биологическое влияние сброса теплых вод в неглубокий (8–15 м) водоносный горизонт в 2 км от Фрайзинга (Германия). Естественная среднегодовая температура подземных вод в этом районе составляет 11°C, а температура сбрас-

сываемых вод не превышает 21°C. Авторы отмечают незначительное влияние температуры на численность и продуктивность бактерий и фауны. По крайней мере, влияние существенно меньше естественной пространственной и сезонной изменчивости этих характеристик.

Таким образом, подземная температурная аномалия от рассмотренного и ему подобного локальных объектов не вносит сколько-нибудь заметного вклада в экологию города. Несмотря на отсутствие научно обоснованных ограничений, Рамочная директива Европейского союза по воде (EU-WFD, 2000) однозначно определяет любой выброс тепла в грунтовые воды как загрязнение и предписывает поддержание температурной аномалии на возможно низком уровне (Blum et al., 2021). В Швейцарии принято ограничивать подземную температурную аномалию на уровне, не более чем на ± 3 К отличающемся от естественных среднегодовых температур, а в Германии – на ± 6 К (Briellmann et al., 2009).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере здания Института геофизики УрО РАН показано, что основные кондуктивные потери тепла происходят через его внешние конструктивные элементы (стены, окна, крышу) и лишь четверть – через подвал. При этом большая часть – через стены подвала. Суммарные потери за 40 лет эксплуатации здания значительны (133 ТДж) и определяются низкими теплоизоляционными свойствами конструктивных элементов. По данным моделирования направленные в грунт потоки тепла сформировали подземную температурную аномалию, к настоящему времени распространяющуюся на 15 м в стороны от здания и на 40 м в глубину (по изоаномале 2 К). Все тепло, накопленное в недрах, составило 3.2 ТДж, или 2.4% от суммарных кондуктивных теплотерь. И хотя утечки тепла из зданий играют ключевую роль в формировании подземного городского острова тепла, в 36 раз превышая климатический вклад, обусловленный глобальным потеплением, экономическое значение этой “бесплатной” энергии сомнительно, а экологические следствия ничтожны. Подземный городской остров тепла, к счастью, пока представляет лишь научный интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Спивак А.А., Овчинников В.М., Соловьев С.П., Спунгин В.Г. (1995) Геоэкологический контроль за геофизическими полями мегаполиса. *Геоэкология*, (2), 44-56.
- Анохин А.А., Житин Д.В., Краснов А.И., Лачининский С.С. (2014) Современные тенденции динамики численности населения городов России. *Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле*, (4), 167-179.
- Белоусова А.П., Проскурина И.В. (2008). Принципы районирования территории по степени опасности и рисков загрязнения подземных вод. *Водные ресурсы*, **35**(1), 110-122.
- Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. (2012) Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании. *Инженерно-строительный журнал*, (8), 4-14. <https://doi.org/10.5862/МСЕ.34.1>
- Горностаева А.А., Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Вдовин А.Г., Факаева Н.Р. (2024) Влияние зданий на подземное тепловое поле г. Екатеринбург. *Геофизические процессы и биосфера*, **23**(2), 12-24. <https://doi.org/10.21455/GPB2024.2-2>
- Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Хацкевич Б.Д., Вдовин А.Г., Факаева Н.Р. (2024) Подземный городской остров тепла Екатеринбурга. *Литосфера*, **24**(3), 566-581. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-566-581>
- Коридалин В.Е., Кузьмина Н.В., Осика В.И., Попов Е.И., Токмаков В.А. (1985) Сейсмические шумы индустриального города. *Докл. АН СССР*, **280**(5), 1094-1097.
- Спивак А.А., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. (2016) Геофизические поля мегаполиса. *Геофизические процессы и биосфера*, **15**(2), 39-54.
- Шулейкин В.Н. (2014) Пары воды, атмосферное электричество и поступление радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу. *Геофизические процессы и биосфера*, **13**(3), 31-41.
- Arning E., Kölling M., Schulz H.D., Panteleit B., Reichling J. (2006) Einfluss oberflächennaher Warmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. *Grundwasser*, **11**(1), 27-39.
- Attard G., Rossier Y., Winiarski T., Eisenlohr L. (2016) Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. *Sci. Total Env.*, **572**, 986-994. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.229>
- Bayer P., Attard G., Blum P., Menberg K. (2019) The geothermal potential of cities *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **106**, 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.019>
- Bayer P., Rivera J.A., Schweizer D., Schärli U., Blum P., Rybach L. (2016) Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles. *Geothermics*, **64**, 289-299. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.011>
- Benz S.A., Bayer P., Blum P., Hamamoto H., Arimoto H., Taniguchi M. (2018) Comparing anthropogenic heat input and heat accumulation in the subsurface of Osaka, Japan. *Sci. Total Env.*, **643**, 1127-1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.253>
- Benz S.A., Bayer P., Menberg K., Jung S., Blum P. (2015) Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Sci. Total Env.*, **524**, 427-439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.003>
- Bidarmaghz A., Choudhary R., Soga K., Terrington R.L., Kessler H., Thorpe S. (2020) Large-scale urban underground hydro-thermal modelling – a case study of the Royal Borough of Kensington and Chelsea, London. *Sci. Total Env.*, **700**, 134955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134955>
- Blum P., Menberg K., Koch F., Benz S.A., Tissen C., Hemmerle H., Bayer P. (2021) Is thermal use of groundwater a pollution? *J. Contaminant Hydrol.*, **239**, 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jchhyd.2021.103791>

- doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103791
- Briellmann H., Griebler C., Schmidt S.I., Michel R., Lueders T. (2009) Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiol. Ecol.*, **68**(3), 273-286. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x>
- Brons H.J., Griffioen J., Appelo C.A.J., Zehnder A.J.B. (1991) (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Res.*, **25**(6), 729-736.
- Castiello G., Florio G., Grimaldi M., Fedi M. (2010) Enhanced methods for interpreting microgravity anomalies in urban areas. *First Break*, **28**(8), 93-98. <http://doi.org/10.3997/1365-2397.28.8.40741>
- Chandler T.J. (1976) *The Climate of the British Isles*. Boston: Addison-Wesley Longman Ltd, 390 p.
- Chu Z., Loria A.F.R. (2024) Modeling underground climate change across a city based on data about a building block. *Sustain. Cities Soc.*, **114**, 105775. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105775>
- Dědeček P., Šafanda J., Rajver D. (2012) Detection and quantification of local anthropogenic and regional climatic transient signals in temperature logs from Czechia and Slovenia. *Climatic change*, **113**, 787-801. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0373-5>
- Ferguson G., Woodbury A.D. (2004) Subsurface heat flow in an urban environment. *J. Geophys. Res.*, **109**, B02402. <https://doi.org/10.1029/2003JB002715>
- Hähnlein S., Bayer P., Ferguson G., Blum P. (2013) Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, **59**, 914-925. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.040>
- Hemmerle H., Ferguson G., Blum P., Bayer P. (2022) The evolution of the geothermal potential of a subsurface urban heat island. *Env. Res. Lett.*, **17**(8), 084018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7e60>
- Jung N., Paiho S., Shemeikka J., Lahdelma R., Airaksinen M. (2018) Energy performance analysis of an office building in three climate zones. *Energy and Buildings*, **158**, 1023-1035. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.030>
- Kim S.W., Brown R.D. (2021) Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Sci. Total Env.*, **779**, 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
- Lokoshchenko M.A. (2014) Urban 'heat island' in Moscow. *Urban Climate*, **10**, 550-562. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.008>
- Loria A.F.R., Thota A., Thomas A.M., Friedle N., Lautenberg J.M., Song E.C. (2022) Subsurface heat island across the Chicago Loop district: Analysis of localized drivers. *Urban Climate*, **44**, 101211. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101211>
- Luo Z., Asproudi C. (2015) Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change. *App. Thermal Eng.*, **90**, 530-537. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.025>
- Menberg K., Bayer P., Zosseder K., Rumohr S., Blum P. (2013) Subsurface urban heat islands in German cities. *Sci. Total Env.*, **442**, 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.043>
- Mohajerani A., Bakaric J., Jeffrey-Bailey T. (2017) The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *J. Environ. Manage.*, **197**, 522-538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Oke T.R. (1973) City size and the urban heat island. *Atmospheric Env.* (1967), **7**(8), 769-779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Prevati A., Epting J., Crosta G.B. (2022) The subsurface urban heat island in Milan (Italy) – A modeling approach covering present and future thermal effects on groundwater regimes. *Sci. Total Env.*, **810**, 152119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152119>
- Schweighofer J.A., Wehrli M., Baumgärtel S., Rohn J. (2021) Detecting groundwater temperature shifts of a subsurface urban heat island in SE Germany. *Water*, **13**(10), 1417. <https://doi.org/10.3390/w13101417>
- Smith M., Hargroves K.C., Stasinopoulos P., Stephens R., Desha C., Hargroves S. (2007) *Energy Transformed: Sustainable energy solutions for climate change mitigation*. Brisbane, QUT ePrints, 600 p.
- Stewart I.D., Krayenhoff E.S., Voogt J.A., Lachapelle J.A., Allen M.A., Broadbent A.M. (2021) Time evolution of the surface urban heat island. *Earth's Future*, **9**(10), p.e2021EF002178. <https://doi.org/10.1029/2021EF002178>
- Taniguchi M. (1993) Evaluation of vertical groundwater fluxes and thermal properties of aquifers based on transient temperature-depth profiles. *Water Resources Res.*, **29**(7), 2021-2026. <https://doi.org/10.1029/93WR00541>
- Tien P.W., Wei S., Liu T., Calautit J., Darkwa J., Wood C. (2021) A deep learning approach towards the detection and recognition of opening of windows for effective management of building ventilation heat losses and reducing space heating demand. *Renewable Energy*, **177**, 603-625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.155>
- Tzavali A., Paravantis J.P., Mihalakakou G., Fotiadi A., Stigka E. (2015) Urban heat island intensity: A literature review. *Fresenius Envir. Bull.*, **24**(12b), 4537-4554.
- Visser P.W., Henk K., Bense V., Emiel B. (2020) Impacts of progressive urban expansion on subsurface temperatures in the city of Amsterdam (The Netherlands). *Hydrogeol. J.*, **28**(5), 1755-1772. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02150-w>
- Westaway R., Scotney P.M., Younger P.L., Boyce A.J. (2015) Subsurface absorption of anthropogenic warming of the land surface: The case of the world's largest brickworks (Stewartby, Bedfordshire, UK). *Sci. Total Env.*, **508**, 585-603. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.109>
- Zhu K., Blum P., Ferguson G., Balke K.-D., Bayer P. (2010) The geothermal potential of urban heat islands. *Environ. Res. Lett.*, **5**, 044002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044002>

REFERENCES

- Adushkin V.V., Spivak A.A., Ovchinnikov V.M., Solov'yev S.P., Spungin V.G. (1995) Geophysical control on the geophysical fields of megapolise. *Geokologiya*, (2), 44-56. (In Russ.)
- Anokhin A.A., Zhitin D.V., Krasnov A.I., Lachininsky S.S. (2014) Modern trends in population quantity dynamics of cities in Russia. *Vestn. Sankt-Peterburgskogo un-ta. Nauki o Zemle*, (4), 167-179. (In Russ.)
- Arning E., Kölling M., Schulz H.D., Panteleit B., Reichling J. (2006) Einfluss oberflächennaher Warmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. *Grundwasser*, **11**(1), 27-39.
- Attard G., Rossier Y., Winiarski T., Eisenlohr L. (2016) Deterministic modeling of the impact of underground

- structures on urban groundwater temperature. *Sci. Total Env.*, **572**, 986-994. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.229>
- Bayer P., Attard G., Blum P., Menberg K. (2019) The geothermal potential of cities *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **106**, 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.019>
- Bayer P., Rivera J.A., Schweizer D., Schärli U., Blum P., Rybach L. (2016) Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles. *Geothermics*, **64**, 289-299. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.011>
- Belousova A.P., Proskurina I.V. (2008) Principles of zoning a territory by the hazard risks of groundwater pollution. *Water Res.*, **35**(1), 108-119 (translated from *Vodnye resursy*, **35**(1), 110-122). <https://doi.org/10.1007/s11268-008-1013-y>
- Benz S.A., Bayer P., Blum P., Hamamoto H., Arimoto H., Taniguchi M. (2018) Comparing anthropogenic heat input and heat accumulation in the subsurface of Osaka, Japan. *Sci. Total Env.*, **643**, 1127-1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.253>
- Benz S.A., Bayer P., Menberg K., Jung S., Blum P. (2015) Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Sci. Total Env.*, **524**, 427-439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.003>
- Bidarmaghz A., Choudhary R., Soga K., Terrington R.L., Kessler H., Thorpe S. (2020) Large-scale urban underground hydro-thermal modelling – a case study of the Royal Borough of Kensington and Chelsea, London. *Sci. Total Env.*, **700**, 134955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134955>
- Blum P., Menberg K., Koch F., Benz S.A., Tissen C., Hemmerle H., Bayer P. (2021) Is thermal use of groundwater a pollution? *J. Contaminant Hydrol.*, **239**, 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103791>
- Briellmann H., Griebler C., Schmidt S.I., Michel R., Lueders T. (2009) Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiol. Ecol.*, **68**(3), 273-286. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x>
- Brons H.J., Griffioen J., Appelo C.A.J., Zehnder A.J.B. (1991) (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Res.*, **25**(6), 729-736.
- Castiello G., Florio G., Grimaldi M., Fedi M. (2010) Enhanced methods for interpreting microgravity anomalies in urban areas. *First Break*, **28**(8), 93-98. <http://doi.org/10.3997/1365-2397.28.8.40741>
- Chandler T.J. (1976) *The Climate of the British Isles*. Boston, Addison-Wesley Longman Ltd, 390 p.
- Chu Z., Loria A.F.R. (2024) Modeling underground climate change across a city based on data about a building block. *Sustain. Cities Soc.*, **114**, 105775. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105775>
- Dědeček P., Šafanda J., Rajver D. (2012) Detection and quantification of local anthropogenic and regional climatic transient signals in temperature logs from Czechia and Slovenia. *Climatic change*, **113**, 787-801. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0373-5>
- Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Khatskevich B.D., Vdovin A.G., Fakaeva N.R. (2024) Subsurface urban heat island in the city of Ekaterinburg. *Lithosphere (Russia)*, **24**(3), 566-581. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-566-581>
- Ferguson G., Woodbury A.D. (2004) Subsurface heat flow in an urban environment. *J. Geophys. Res.*, **109**, B02402. <https://doi.org/10.1029/2003JB002715>
- Gornostaeva A.A., Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Vdovin A.G., Fakaeva N.R. (2024) Influence of buildings on the subsurface thermal field of Ekaterinburg city. *Geofizicheskie Protessy i Biosfera*, **23**(2), 12-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/GPB2024.2-2>
- Hähnlein S., Bayer P., Ferguson G., Blum P. (2013) Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, **59**, 914-925. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.040>
- Hemmerle H., Ferguson G., Blum P., Bayer P. (2022) The evolution of the geothermal potential of a subsurface urban heat island. *Env. Res. Lett.*, **17**(8), 084018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7e60>
- Jung N., Paiho S., Shemeikka J., Lahdelma R., Airaksinen M. (2018) Energy performance analysis of an office building in three climate zones. *Energy and Buildings*, **158**, 1023-1035. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.030>
- Kim S.W., Brown R.D. (2021) Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Sci. Total Env.*, **779**, 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
- Koridalin V.E., Kuz'mina N.V., Osika V.I., Popov E.I., Tokmakov V.A. (1985) Seismic noise of an industrial city. *Dokl. AN SSSR*, **280**(5), 1094-1097. (In Russ.)
- Lokoshchenko M.A. (2014) Urban 'heat island' in Moscow. *Urban Climate*, **10**, 550-562. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.008>
- Loria A.F.R., Thota A., Thomas A.M., Friedle N., Lautenberg J.M., Song E.C. (2022) Subsurface heat island across the Chicago Loop district: Analysis of localized drivers. *Urban Climate*, **44**, 101211. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101211>
- Luo Z., Asproudi C. (2015) Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change. *App. Thermal Eng.*, **90**, 530-537. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.025>
- Menberg K., Bayer P., Zosseder K., Rumohr S., Blum P. (2013) Subsurface urban heat islands in German cities. *Sci. Total Env.*, **442**, 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.043>
- Mohajerani A., Bakaric J., Jeffrey-Bailey T. (2017) The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *J. Environ. Manage.*, **197**, 522-538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Oke T.R. (1973) City size and the urban heat island. *Atmospheric Env. (1967)*, **7**(8), 769-779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Prevati A., Epting J., Crosta G.B. (2022) The subsurface urban heat island in Milan (Italy) – A modeling approach covering present and future thermal effects on groundwater regimes. *Sci. Total Env.*, **810**, 152119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152119>
- Schweighofer J.A., Wehrl M., Baumgärtel S., Rohn J. (2021) Detecting groundwater temperature shifts of a subsurface urban heat island in SE Germany. *Water*, **13**(10), 1417. <https://doi.org/10.3390/w13101417>
- Shuleikin V.N. (2015) Water vapor, atmospheric electricity, and radon transfer to the near-surface soil layers and the atmosphere. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **51**(7), 688-692 (translated from *Geofizicheskie Protessy i Biosfera*,

- 13(3), 31-41). <https://doi.org/10.1134/S0001433815070087>
- Smith M., Hargroves K.C., Stasinopoulos P., Stephens R., Desha C., Hargroves S. (2007) Energy Transformed: Sustainable energy solutions for climate change mitigation. Brisbane, QUT ePrints, 600 p.
- Spivak A.A., Loktev D.N., Rybnov Yu.S., Soloviev S.P., Kharlamov V.A. Geophysical fields of megapolis. *Geofizicheskie Protssessy i Biosfera*, **15**(2), 39-54 (In Russ.)
- Stewart I.D., Krayenhoff E.S., Voogt J.A., Lachapelle J.A., Allen M.A., Broadbent A.M. (2021) Time evolution of the surface urban heat island. *Earth's Future*, **9**(10), p.e2021EF002178. <https://doi.org/10.1029/2021EF002178>
- Taniguchi M. (1993) Evaluation of vertical groundwater fluxes and thermal properties of aquifers based on transient temperature–depth profiles. *Water Resources Res.*, **29**(7), 2021-2026. <https://doi.org/10.1029/93WR00541>
- Tien P.W., Wei S., Liu T., Calautit J., Darkwa J., Wood C. (2021) A deep learning approach towards the detection and recognition of opening of windows for effective management of building ventilation heat losses and reducing space heating demand. *Renewable Energy*, **177**, 603-625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.155>
- Tzavali A., Paravantis J.P., Mihalakakou G., Fotiadi A., Stigka E. (2015) Urban heat island intensity: A literature review. *Fresenius Envir. Bull.*, **24**(12b), 4537-4554.
- Vatin N.I., Nemova D.V., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. (2012) Influence of building envelope thermal protection on heat loss value in the building. *Inzhenerno-stroitel'nyi Zhurnal*, (8), 4-14. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.34.1>
- Visser P.W., Henk K., Bense V., Emiel B. (2020) Impacts of progressive urban expansion on subsurface temperatures in the city of Amsterdam (The Netherlands). *Hydrogeol. J.*, **28**(5), 1755-1772. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02150-w>
- Westaway R., Scotney P.M., Younger P.L., Boyce A.J. (2015) Subsurface absorption of anthropogenic warming of the land surface: The case of the world's largest brickworks (Stewartby, Bedfordshire, UK). *Sci. Total Env.*, **508**, 585-603. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.109>
- Zhu K., Blum P., Ferguson G., Balke K.-D., Bayer P. (2010) The geothermal potential of urban heat islands. *Environ. Res. Lett.*, **5**, 044002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044002>