

УДК 550.361.4; 551.588.7

ТЕПЛОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНОЙ СРЕДЫ ЕКАТЕРИНБУРГА

**Б. Д. Хацкевич, Д. Ю. Демежко, А. А. Горностаева, А. Г. Вдовин,
Н. Р. Факаева**

*Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, ул. Амундсена, 100, 620016,
г. Екатеринбург, Россия, disaybl@yandex.ru*

По данным термометрии в скважинах Екатеринбурга и его окрестностей исследованы закономерности распределения аномальных температур в подземной среде города и источники теплового загрязнения. Фоновые среднегодовые температуры в интервале 20–50 м составляют 5–6 °С. Повышенные значения подземной температуры (>6 °С) сосредоточены в центральной части города. Основными источниками теплового загрязнения подземной среды города, являются утечки тепла из зданий, аномально поглощающие тепло городские покрытия, фильтрация подземных вод. Оценено изменение теплосодержания горных пород вследствие теплового загрязнения.

Ключевые слова: подземные температуры; тепловое загрязнение; термометрия скважин; теплосодержание; городской остров тепла; фильтрация подземных вод.

THERMAL POLLUTION OF AN UNDERGROUND ENVIRONMENT OF YEKATERINBURG

**B. D. Khatskevich, D. Yu. Demezhko, A. A. Gornostaeva, A. G. Vdovin,
N. R. Fakaeva**

Institute of Geophysics of the Urals Branch of RAS, 100 Amundsen Str., 620016, Yekaterinburg, Russia, disaybl@yandex.ru

Patterns of distribution of anomalous temperatures in the underground environment of the city and sources of thermal pollution were studied based on data on temperature measurements in boreholes of Yekaterinburg and rural surroundings. Undisturbed natural mean annual temperatures at the depth interval of 20–50 m are equal to 5–6 °C. Increased values of subsurface temperature (>6 °C) are concentrated in the central part of the city. The main sources of thermal pollution of the underground environment of the city include heat leaks from buildings, abnormally heat-absorbing urban coatings, groundwater filtration. The change in the heat content of rocks due to thermal pollution has been assessed.

Keywords: underground temperatures; thermal pollution; borehole temperature measurements; heat content; urban heat island; groundwater filtration.

Интенсивное развитие урбанизированных территорий оказывает существенное влияние на состояние окружающей среды, меняя климат

городов, состояние почв и грунтов, рельефа, поверхностных и подземных вод [1–5]. Интенсивная антропогенная деятельность приводит к тепловому загрязнению приземной атмосферы, наземной и подземной гидросферы, подземной геологической среды городов. На фоне продолжающегося глобального потепления, учащения опасных природных явлений и необходимости адаптации к меняющимся условиям вопрос изучения теплового состояния городской среды, особенностей пространственно-временного распределения тепловых потоков, теплообмена на земной поверхности и факторов, его определяющих, становится все более актуальным.

Целью нашего исследования является выявление закономерностей пространственного распределения подземных температур в Екатеринбурге, определение основных источников теплового загрязнения и количественная оценка изменения теплосодержания горных пород в результате техногенного воздействия.

Основным источником информации о состоянии теплового поля подземной среды являются данные скважинной термометрии. Для анализа состояния подземного теплового поля города и близлежащих сельских территорий в период с октября 2022 г. по июль 2023 г. с периодичностью раз в четыре месяца проводился цикл температурных измерений в скважинах, расположенных в Екатеринбурге и в его окрестностях (рис. 1). Температура в водонаполненной части скважин измерялась через 1 м с помощью автономного температурного логгера DW1212 фирмы Daowan с действующими заводскими калибровками (погрешность $\pm 0.002\text{K}$, постоянная времени ~ 1 сек). Распределения среднегодовой температуры по скважинам приведены на рис. 2. Диапазон среднегодовых температур на глубинах 10–50 м составляет $9\text{ }^\circ\text{C}$. При этом выделяется компактная группа термограмм, записанных в окрестностях Екатеринбурга и на его окраинах (за пределами объездной дороги), для которых температурные различия не превышают $1\text{ }^\circ\text{C}$ (обозначены синим цветом). Среднее по этой группе значение температуры в интервале 20–50 м, равное $5.35 \pm 0.25\text{ }^\circ\text{C}$, и характерный близкий к нулевому температурный градиент определяют естественный температурный фон, не подверженный влиянию урбанизации. На этом фоне термограммы, записанные в центральных частях города, особенно вблизи зданий и непосредственно под ними, фиксируют аномально высокие среднегодовые температуры и, часто, аномально высокий отрицательный температурный градиент (обозначены красным цветом). В скважинах, расположенных на открытых городских пространствах, наблюдаются умеренные температурные аномалии (обозначены зеленым), обусловленные присутствием искусственных городских покрытий с низким альбедо, а также влиянием эффекта городского острова тепла [1, 6–8].

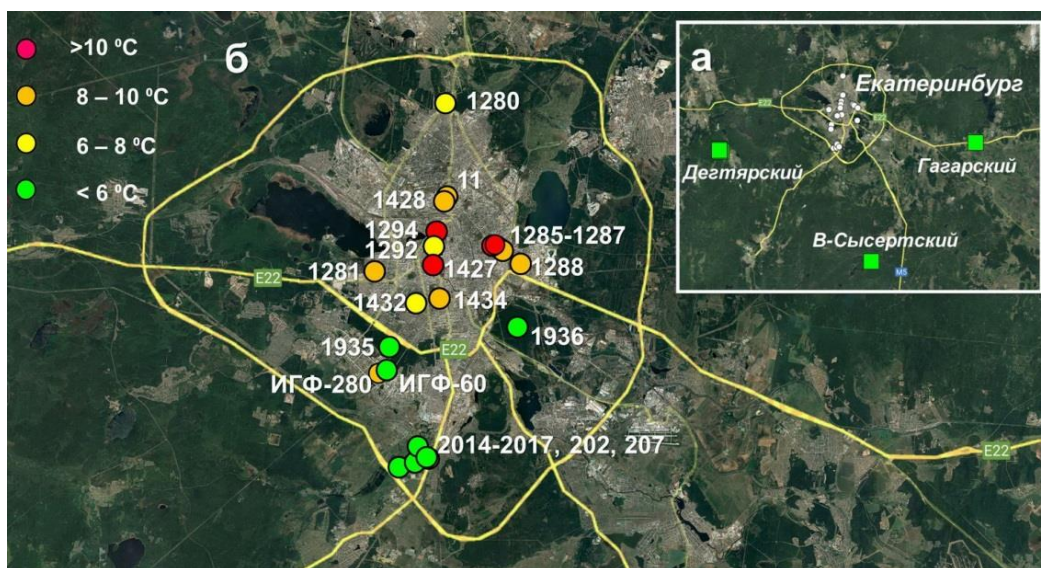


Рис. 1. Расположение и среднегодовые температуры в скважинах на глубине 20 м в окрестностях (а) и в пределах Екатеринбурга (б)

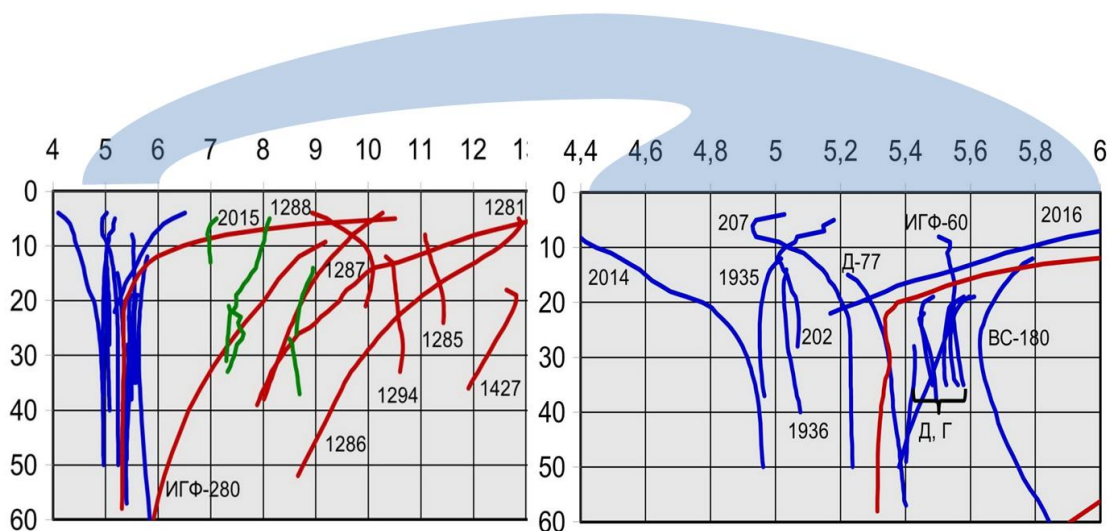


Рис. 2. Распределение среднегодовых температур по скважинам Екатеринбурга и окрестностей. Горизонтальная ось – температура, °С, вертикальная – глубина, м

Годовые колебания температуры земной поверхности в кондуктивном режиме полностью затухают на глубине 20 м. Вертикальная (нисходящая) фильтрация подземных вод уменьшает темпы затухания и способствует распространению годовой волны на большие глубины [9–11]. Нисходящая фильтрация со скоростью 24 м/год в интервале 10–15 м и 10 м/год – ниже 20 м была выявлена в скважине, расположенной у Городского пруда, в зоне дренажной системы метрополитена.

Техногенная деятельность приводит не только к повышению подземных температур, но и к увеличению теплосодержания горных пород.

Наиболее значительные изменения теплосодержания в интервале 10–50 м связаны с утечками тепла из подвалов зданий $(23–46) \times 10^7$ Дж/м². Однако это, на первый взгляд, значительное количество тепла, составляет лишь сотые доли процента тепловой энергии, израсходованной на отопление. Горные породы с умеренными аномалиями температуры на глубине 20 м в том же интервале накопили около 27×10^7 Дж/м². Прирост теплосодержания на фоновых участках составил не более 5×10^7 Дж/м² — исключительно за счет глобального потепления.

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

Библиографические ссылки

1. *Dědeček P., Šafanda J., and Rajver D.* Detection and quantification of local anthropogenic and regional climatic transient signals in temperature logs from Czechia and Slovenia // *Climatic change*. 2012. Vol. 113. P. 787–801.
2. *Шестернев Д. М., Васютин Л. А.* Тепловое загрязнение геологической среды криолитозоны урбанизированных территорий Забайкалья (на примере г. Чита) // *Вестник ЧитГУ*. № 1(80). 2012. С. 43–51.
3. *Epting J., Händel F., and Huggenberger P.* Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 17(5). P. 1851–1869.
4. *Lokoshchenko M. A.* Urban ‘heat island’ in Moscow // *Urban Climate*. 2014. Vol. 10. P. 550–562.
5. *Schweighofer J. A., Wehrl M., Baumgärtel S., and Rohn J.* Detecting groundwater temperature shifts of a subsurface urban heat island in SE Germany // *Water*. 2021. Vol. 13(10). P. 1417.
6. *Ferguson G., and Woodbury A. D.* Subsurface heat flow in an urban environment // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. B02402.
7. *Takebayashi H., and Moriyama M.* Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking // *Solar Energy*. 2009. Vol. 83(8). P. 1211–1223.
8. *Wang C., Wang Z. H., Kaloush K. E., and Shacat J.* Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 146. P. 111–171.
9. *Taniguchi M.* Evaluation of vertical groundwater fluxes and thermal properties of aquifers based on transient temperature-depth profiles // *Water Resources Research*. 1993. Vol. 29(7). P. 2021–2026.
10. *Демежко Д. Ю., Рывкин Д. Г., Голованова И. В.* О совместном влиянии фильтрации подземных вод и палеоклимата на тепловое поле верхней части земной коры // *Уральский геофизический вестник*. 2006. № 1. С. 16–26.
11. *Majumder R. K., Shimada J., and Taniguchi M.* Groundwater flow systems in the Bengal Delta, Bangladesh, inferred from subsurface temperature readings // *Songklanakarin Journal of Science & Technology*. 2013. Vol. 35(1). P. 99–106.