ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 3, с. 341–345

УДК 551.584:528.88

ВЛИЯНИЕ МИКРОКЛИМАТА НА ТЕМПЕРАТУРУ ИСКУССТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2021 г. В. И. Демин[1], *, Б. В. Козелов[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия*

**E-mail: demin@pgia.ru*

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.
После доработки 20.10.2020 г.
Принята к публикации 27.11.2020 г.

В ночное время температура искусственных городских поверхностей подвержена влиянию окружающего микроклимата. Несмотря на влияние других факторов, в первом приближении значение микроклиматической изменчивости температуры искусственных поверхностей можно считать близкой к значению микроклиматической изменчивости температуры воздуха в данной местности.

DOI: 10.31857/S0367676521030091

ВВЕДЕНИЕ

Источником информации о термическом режиме той или иной местности являются данные ближайших метеорологических станций (МС). Как правило, главным критерием отбора, становится их наиболее близкое положение. Данный подход нельзя считать правильным. Многочисленные полевые исследования показывают, что основные климатические показатели из-за особенностей микроклимата на близких расстояниях могут изменяться даже сильнее, чем при переходе из одной климатической зоны в другую [1]. В частности, микроклиматическая изменчивость термических характеристик воздуха может на порядок превышать свой характерный широтный и высотный градиент.

В условиях неоднородной подстилающей поверхности или сложного рельефа перенос данных МС на районы, не охваченные регулярными наблюдениями, не всегда оказывается корректным. Например, температурные напряжения растяжения или сжатия в проводах электрических линий или железнодорожных рельсах зависят именно от локальной температуры, которая может сильно отличаться от ее значения на ближайшей МС. Было показано, что на территории Мурманской области перепады температур зимой даже в условиях слабохолмистого рельефа за счет разных условий для стока и накопления холодного воздуха по элементам рельефа на расстоянии всего в 2–3 км могут достигать 10–15°С [2].

В случае температуры воздуха или почвы проблема частично решается введением микроклиматических поправок, значения которых для разных условий приведены в ряде специальных изданий (см., например, [1]). Гораздо менее изученным является вопрос о микроклиматических вариациях температуры искусственных поверхностей (автодороги, крыши и стены зданий, другие конструкции и сооружения). Между тем, для правильной эксплуатации многих объектов такой учет представляется необходимым.

Целью данной работы является обнаружение и количественная оценка эффекта окружающего микроклимата на температуру ряда искусственных поверхностей (ИП).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы измерения, выполненные Полярным геофизическим институтом в Мурманской области, а также данные Территориально-ситуационного центра ФКУ “Управление Федеральной автомобильной магистрали Санкт-Петербург–Мурманск” (ФКУ Упрдор “Кола”).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температура искусственных поверхностей ($T_{ИП}$) зависит от большого числа факторов: интенсивности солнечного излучения, погодные условия (облака, осадки, ветер), вида, цвета и текстуры материала, его формы и пространственной ориентации, условий затенения, теплопереноса посредством теплопроводности внутрь конструкции, теплообмена с наружным воздухом, величины длинноволновой тепловой эмиссии. Суммарный эффект этих факторов проявляется в очень сложной картине пространственного распределения $T_{ИП}$ над техногенной территорией даже в условиях однородного микроклимата.

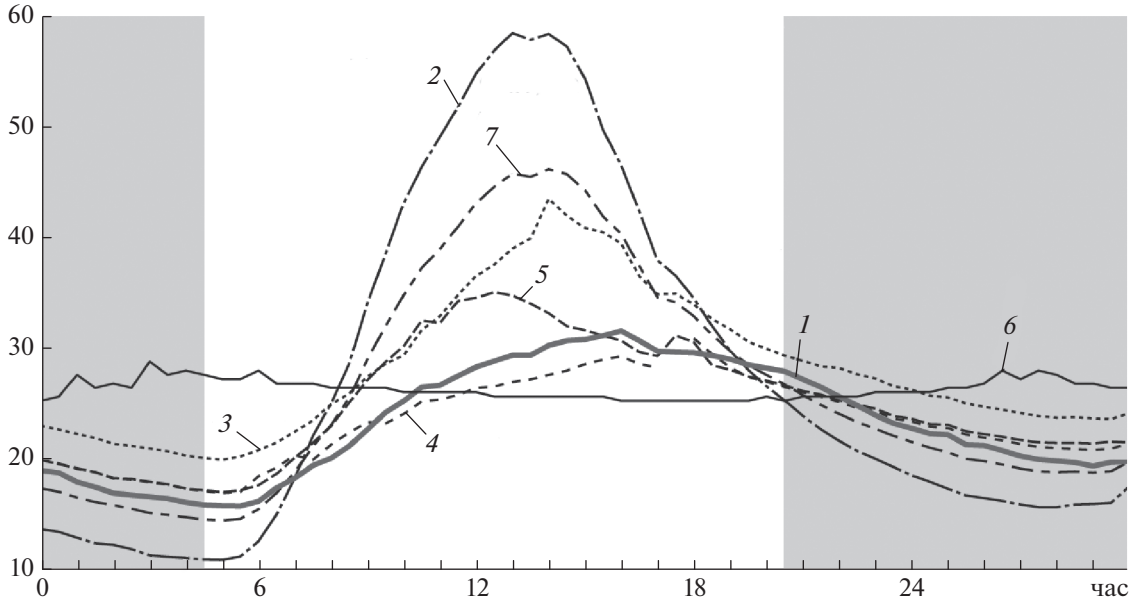

Рис. 1. Суточный ход температур в ориентированном с запада на восток уличном каньоне: *1* – воздуха в каньоне, *2* – плоской крыши, *3* – дороги, *4* – северной стены, *5* – южной стены, *6* – внутри зданий, *7* – средняя каньона и крыш; рисунок построен по [3].

Общее представление о суточном ходе температуры по ряду наиболее характерных для города поверхностей можно получить из рис. 1. Днем ИП нагреваются за счет поглощения солнечной радиации. Температура отдельных объектов может на десятки градусов отличаться от температуры прилегающих слоев воздуха. Для сравнения, температура незатененных листьев в большинстве случаев в зависимости от их ориентации лишь на 2–4°С выше, чем воздуха [4].

Тепловой режим ИП существенно отличатся от теплового режима природных объектов. В то же время ИП находятся в постоянном теплообмене с окружающим воздухом и, как следствие, должны реагировать на вариации его температуры, в т.ч., и микроклиматические.

Большой диапазон пространственных вариаций $T_{ИП}$ днем не позволят выделить в них в это время суток эффекты, вызванные микроклиматическими неоднородностями в поле температуры воздуха ($T_{возд}$). Например, вариации дневной $T_{возд}$ в холмистом рельефе, как правило, не превышают 0.5–1.5°С [5]. В то же время разница в температуре, например, по поперечному сечению рельса (головка, шейка, подошва) на локальном участке с одинаковым окружающим микроклиматом в зависимости только от условий освещения этих поверхностей Солнцем достигает 10°С [6].

Картина меняется ночью. Длинноволновое излучение ИП выше, чем у воздуха. Благодаря этому поверхности быстро теряют тепло, а турбулентный теплообмен выравнивает их температуру и температуру прилегающего слоя воздуха. Температурный контраст разных ИП также уменьшается (рис. 1).

Для иллюстрации на рис. 2 показаны вариации температуры плоской поверхности крыши с битумным покрытием в г. Апатиты (Мурманская обл.) и $T_{возд}$ на высоте 50 см над ней. Хорошо заметен сильный перегрев поверхности крыши в дневные часы и кратковременные вариации температуры поверхности, вызванные меняющимися погодными условиями (изменения облачности или скорости ветра). В ночное время температура кровельной поверхности приближается к температуре окружающего воздуха, а при ясной сухой погоде даже опускается ниже. Эффект ночного охлаждения поверхности кровли одинаков как для темных, так и для светлых покрытий [7, 8].

Аналогичная картина наблюдается при сравнении $T_{возд}$ и дорожного покрытия (рис. 2*б*). В дневные часы поверхность автодороги перегревается, но ночью ее температура приближается к $T_{возд}$, хотя и остается, как правило, выше из-за теплового потока из глубины дорожного полотна (в условиях Мурманской области солнечная радиация сохраняется и в июне – полярный день).

Повышенный интерес к этим двум типам поверхностей (крыши и дорожное полотно) не случаен. В дневные часы крыши, как правило, являются самыми перегретыми среди всех ИП в городе (рис. 1) и, очевидно, задают максимальное значение поверхностного городского острова тепла (ГОТ). В ночное время наиболее теплым становится дно уличных каньонов, составным элементом которого являются дороги.

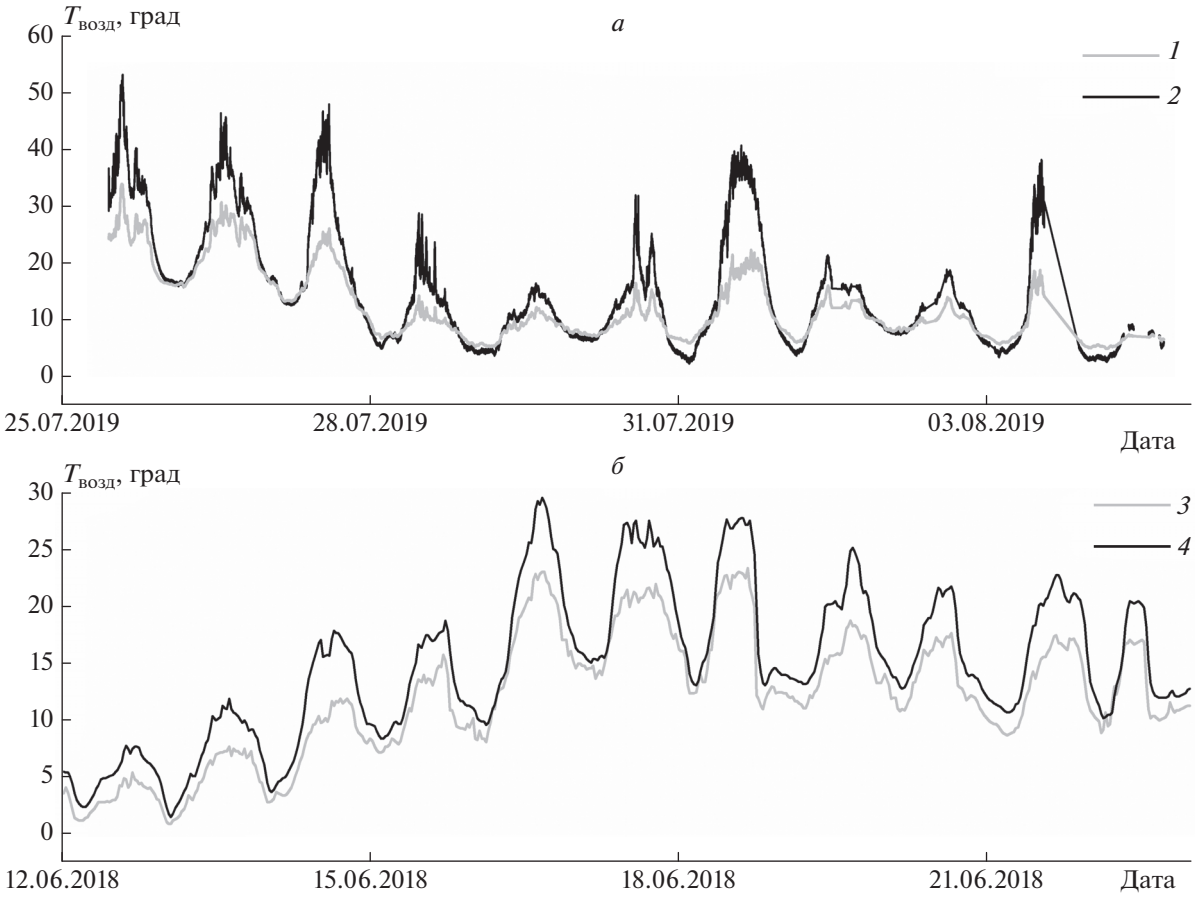

Рис. 2. *а* – Вариации $T_{возд}$ (*1*) и температуры поверхности плоской горизонтальной крыши с битумным покрытием (*2*); *б* – $T_{возд}$ (*3*) и температуры асфальта дорожного полотна (*4*); Мурманская обл.

Интересно также, что дневной поверхностный ГОТ наиболее выражен и заметно сильнее, чем ГОТ в $T_{возд}$. Характерная максимальная интенсивность дневного поверхностного ГОТ достигает 10–15°С, а ГОТ в температуре воздуха – менее 3°С [9]. Ночные же ГОТ в температуре поверхности и в $T_{возд}$ довольно близки по масштабу: 5–10 и 7–12°С, соответственно. Это указывает на более близкие значения $T_{ИП}$ и $T_{возд}$ в ночное время (при осреднении их по территории).

В ряде практических задач температура $T_{ИП}$ в ночное время прямо задается линейной функцией от $T_{возд}$ (см., например, [10, 11]) или даже равной $T_{возд}$ [6]. Это подразумевает, что $T_{ИП}$ должна в той или иной степени отражать особенности окружающего микроклимата.

Важным фактором, сильно влияющим на температуру объектов, является скорость ветра, определяющая интенсивность турбулентного теплообмена. Ветер принадлежит к числу метеоэлементов со значительной пространственной изменчивостью. При этом наибольшие различия проявляются при небольших скоростях – при сильном ветре микроклиматические разности почти нивелируются. Например, при значениях скоростей ветра на открытом ровном месте до 3–5 м/с и устойчивой стратификации (ночь или зима) на вершинах небольших возвышенностей и верхних частях холмов с пологими склонами (крутизной 1–3 градуса) и относительными высотами менее 50 м скорость окажется в среднем в 1.4–1.7 раза сильнее, а в непродуваемых долинах и лощинах – почти в 2 раза ниже [12]. Таким образом, в условиях холмистого рельефа скорость ветра может отличаться многократно даже на соседних участках.

Для иллюстрации реальности присутствия в $T_{ИП}$ микроклиматической составляющей на рис. 3 показаны разности $T_{возд}$ и поверхностей дорожного полотна (асфальт) между двумя автоматическими дорожными метеостанциями (МС). Одна из них расположена в верхней части холма на высоте примерно 210 м н. у. м., а вторая – на прилегающей к холму равнине (135 м н. у. м.). Из-за неоднородностей в поле ветра и облачности разность температур между ними должна варьировать как в отрицательную, так и в положительную сторону примерно на одинаковую величину. В действительности она сильно смещена (табл. 1). В ясную тихую погоду холодный воздух, образующийся на приподнятых

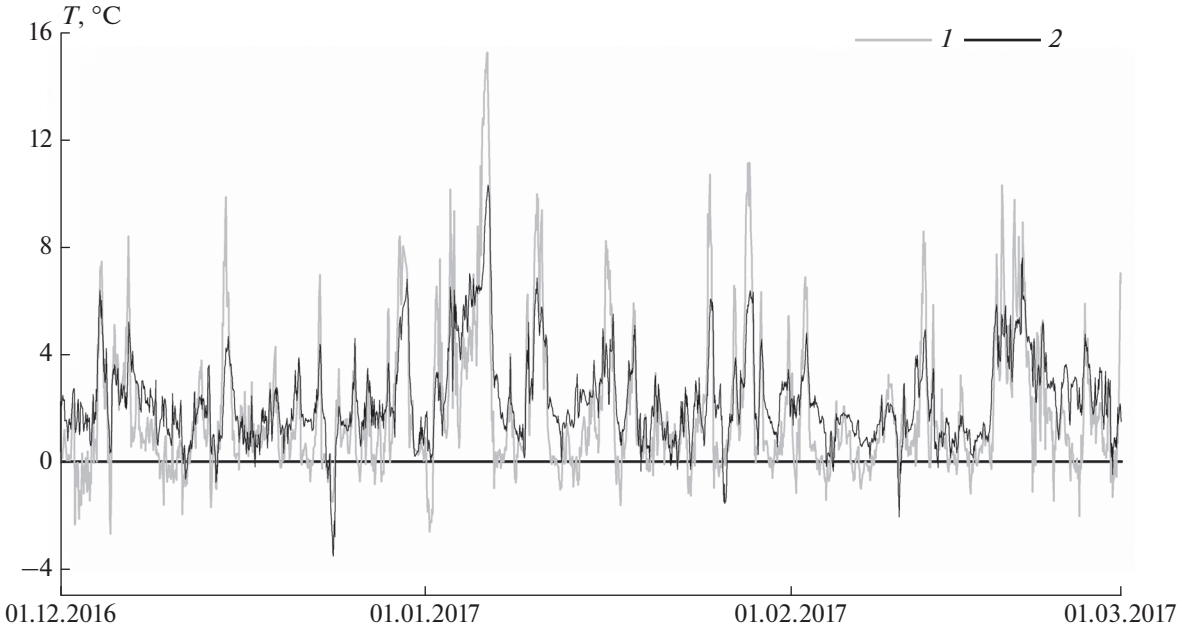

Рис. 3. Разности температур (*1*– температура воздуха, *2* – температура дорожного покрытия (асфальт) между МС в верхней части холма и на прилегающей равнине зимой 2016–2017 гг.; Мурманская обл.

участках местности, как более тяжелый, стекает вниз. Благодаря этому верхние части холмов становятся теплее своих подножий и прилегающей равнины. При этом, появление стоковых течений проявляется как в увеличении разности $T_{возд}$ между вершиной холма и прилегающей равниной, так одновременно и в разности температур дорожного покрытия в указанных местоположениях (рис. 3). Средние микроклиматические поправки к ровному местоположению оказываются довольно близкими по величине (табл. 1), но диапазон вариаций $T_{возд}$ выше за счет большей тепловой инерции земляного полотна дороги [10].

Для северных регионов, где продолжительное время существует период с малыми потоками солнечной радиации или даже их полного отсутствия (полярная ночь), влияние микроклимата на $T_{ИП}$ может оказаться значительным. Наблюдения на территории Мурманской области показывают, что в отсутствии специальных измерений $T_{ИП}$ их микроклиматические вариации в первом приближении можно принять равными микроклиматической изменчивости $T_{возд}$ в данных ландшафтных условиях.

Необходимость учета влияние микроклимата на температуру ИП возникает и в задачах установления природы тепловых аномалий, регистрируемых на инфракрасных (ИК) изображениях со спутников. Интенсивность теплового излучения над городскими территориями выше естественного фона, и городам на ИК-изображениях, в целом, соответствуют положительная тепловая аномалия, наиболее выраженная над активно действующими промышленными предприятиями, промзонами, районами с плотной жилой застройкой. Но получение качественных ИК-снимков возможно только в ясную погоду и при отсутствии сильного ветра [13]. В ночное время эти требования соответствуют погодным условиям, когда в наибольшей степени проявляются естественные микроклимати-

Таблица 1. Разности температур воздуха и дорожного покрытия на автоматических МС в верхней части холма (210 м н. у. м.) и на прилегающей равнине (135 м н. у. м.); СКО – среднеквадратичное отклонение, мин, макс. – минимальная и максимальная зарегистрированные разницы за период параллельных измерений, *N* – количество наблюдений

Разность температур	*N*	Средняя	СКО	Мин.	Макс.
		Зима			
Воздуха	2160	1.8	2.5	–	15.2
Дорожного полотна	2160	2.3	1.7	–3.5	10.3
		май–сентябрь (23–5 час)			
Воздуха	1071	1.4	2.0	–6.0	8.2
Дорожного полотна	1043	1.1	1.5	–3.7	8.3

ческие неоднородности изучаемой местности. Корректное восстановление поля температуры по ИК-изображениям здесь имеет особое значение, так как позволяет количественно оценить антропогенное воздействие на тепловой режим местности – ГОТ, считающийся одним из наиболее эффектных проявлений воздействия человека на климат. Принимая во внимание, что в температуре излучающих ИП содержится микроклиматическая составляющая, нельзя обнаруженные по данным дистанционного зондирования аномалии относить только к техногенным.

Примеры некорректной интерпретации тепловой аномалии в городах рассмотрены в работах [14, 15]. Так, в случае г. Апатиты игнорирование роли микроклимата приводит к объявлению о существовании в городе на площади всего 3 км^2, где нет промышленных предприятий, поверхностного ГОТ величиной до 3.2°C [16] – на порядок выше характерного значения ГОТ, рассчитанного по 56 крупнейшим городам Европы в зимний период (0.4 ± 0.4°C [17]). Если же учесть, что город занимает верхнюю часть холма, который на 30–70 м возвышается над равниной, и откуда осуществляется сток холодного воздуха, то в городе существует и естественная положительная аномалия в температуре $T_{ИП}$. Например, температура автомобильных дорог выше, чем на равнине в среднем на 2.3°C (и более, если ограничиться выборкой только безоблачных дней, когда возможно получение ИК-изображений), а в максимуме – до 10°C (табл. 1). Прямые метеорологические наблюдения в городе и в верхней части фоновых холмов подтверждают, что величина обнаруженной аномалии в действительности не выходит за пределы естественной микроклиматической изменчивости, возможной в холмистом рельефе [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Днем ИП за счет поглощения солнечной радиации нагреваются и их температура, как правило, выше температуры окружающего воздуха. Пространственное распределение $T_{ИП}$ в это время суток характеризуется значительными вариациями, вкладом в которые окружающего естественного микроклимата можно пренебречь.

Ночью температура ИП приближается к температуре прилегающего слоя воздуха. Так как характер теплообмена с окружающим воздухом, сама температура воздуха и интенсивность радиационного излучения существенно различаются в разных местоположениях, $T_{ИП}$ в отсутствии солнечной радиации также содержит информацию об окружающем микроклимате. При отсутствии прямых измерений для оценки обусловленного микроклиматом диапазона температурных вариаций ИП можно принять, что они близки к значениям микроклиматической изменчивости $T_{возд}$ в данной местности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гольцберг И.А.* Микроклимат СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 282 с.
2. *Демин В.И., Заров Е.А.* // Phys. Auroral Phenom. 2018. Т. 41. С. 179.
3. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge University Press, 2017. 582 p.
4. *Полевой А.Н.* Сельскохозяйственная метеорология. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 424 с.
5. *Мищенко З.А.* Биоклимат дня и ночи. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 280 с.
6. *Крейнис З.Л., Селезнева Н.Е.* Бесстыковой путь. М.: Маршрут, 2005. 84 с.
7. *Воронин А.М., Орлов Ю.Н.* // Кров. изол. мат. 2008. № 4. С. 56.
8. *Griggs E.I., Sharp T.R., MacDonald J.M.* // ORNL-6527. Oak Ridge National Laboratory, 1989. P. 57.
9. Reducing urban heat islands: compendium of strategies, urban heat island Basics, U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, 2008.
10. *Кирюхин Г.Н.* // Дор. мост. 2014. № 30. С. 309.
11. *Зябриков В.А., Кобышева Н.В., Циркунов В.С.* Климат и железнодорожный транспорт. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2000. 187 с.
12. *Романова Е.Н.* Микроклиматическая изменчивость основных элементов климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 279 с.
13. *Шилин Б.В.* Тепловая аэросъемка при изучении природных ресурсов. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 247 с.
14. *Демин В.И.* // Совр. пробл. ДДЗ из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 25.
15. *Демин В.И., Козелов Б.В., Горбань Ю.А. и др.* // Фунд. прикл. климат. 2019. Т. 3. С. 121.
16. *Константинов П.И., Грищенко М.Ю., Варенцов М.И.* // Иссл. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 27.
17. *Peng S.S, Piao S.L., Ciais P. et al.* // Environ. Sci. Technol. 2011. V. 46. No. 2. P. 696.

Influence of the microclimate on the temperature of artificial surfaces

V. I. Demin[a], *, B. V. Kozelov[a]

[a] *Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

**e-mail: demin@pgia.ru*

At night the temperature of artificial urban surfaces is influenced by the surrounding microclimate. Despite the influence of other factors, in a first approximation, the value of microclimatic variability of the temperature of artificial surfaces can be considered close to the value of microclimatic variability of air temperature in a given area.