О роли антропогенных и естественных факторов в оценке городского острова тепла

В. И. Демин

*Полярный геофизический институт, Анатиты, 184209, Россия
E-mail: demin@pgia.ru*

Тепловую аномалию на территории города (городской остров тепла), возникающую за счёт антропогенных факторов, следует отличать от естественных микроклиматических неоднородностей в поле температуры. Значительная пространственная изменчивость термических характеристик наблюдается даже на равнинных территориях с небольшими относительными перепадами высот. Она возникает за счёт неодинаковых условий для стока и накопления холодного воздуха в разных формах рельефа или между участками с различными типами подстилающей поверхности. Естественные микроклиматические вариации температуры по своей величине сопоставимы и даже превышают значения островов тепла крупнейших городов и мегаполисов мира и не могут быть игнорированы при оценках техногенного воздействия города на термический режим местности. Например, многие города на Западно-Сибирской равнине возводились на возвышенных участках местности, чтобы избежать подтопления во время паводков и строительства на водонасыщенных (заболоченных) грунтах. Такие местоположения изначально характеризовались более тёплым микроклиматом, чем окружающая местность, из-за стока холодного воздуха и меньшей влажности почв. Антропогенные процессы усилили термический контраст. Если существующую положительную аномалию объявлять только антропогенным эффектом, интенсивность городского острова тепла необоснованно завышается. Корректная оценка городского острова тепла возможна сравнением температуры на городских и фоновых участках только с аналогичными условиями по естественному микроклимату.

Ключевые слова: микроклимат, климат города, городской остров тепла, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 01.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-25-33

В ряде публикаций последних лет сообщается о достаточно интенсивных островах тепла в городах Западной Сибири (Davy, Esau, 2016; Esau, Miles, 2016; Esau et al., 2018; Miles, Esau, 2017). Сам по себе факт их обнаружения не является чем-то удивительным: масштабное строительство и хозяйственная деятельность человека всегда сопровождаются изменениями радиационных, термических, влажностных и аэродинамических характеристик ландшафта, и городской остров тепла (ГОТ) в той или иной степени должен присутствовать во всех городах. Однако устоявшаяся практика оценки ГОТ, когда полностью игнорируется роль естественных процессов в создании тепловых аномалий, вызывает вопросы.

В поле температуры воздуха ГОТ должен проявляться в виде замкнутых вокруг города изотерм с горизонтальным градиентом, направленным от окрестностей к его центру или районам с наиболее плотной застройкой. Провести изотермы на практике, как правило, весьма затруднительно из-за редкой сети метеорологических станций (МС), и изучение ГОТ часто сводят к простому сравнению температуры воздуха на городской ($T_{\text{город}}$) и ближайшей к ней фоновой ($T_{\text{село}}$) МС. Положительный знак разности $\Delta T_{\text{ГОТ}} = T_{\text{город}} - T_{\text{село}}$ рассматривается как присутствие ГОТ, а её численное значение служит его количественной характеристикой (интенсивность ГОТ).

Применить такой приём не всегда представляется возможным, так как не во всех городах ведутся метеорологические измерения. Часто также МС оказывается единственной в городе и расположена не в его застроенной части, а на окраине или в парке, при этом ближайшие к ней фоновые МС могут быть удалены на десятки и даже сотни километров. Кроме того, на разность температуры даже между близкими фоновыми МС существенно влияет окружающий их микроклимат: на границах контрастных по микроклимату участков климатические

показатели меняются даже сильнее, чем при переходе из одной климатической зоны в другую. В частности, микроклиматическая изменчивость термических характеристик воздуха и почвы может на порядок превышать их характерный широтный и высотный градиент (Гольцберг, 1967). Ситуация усугубляется тем, что ГОТ и естественные микроклиматические неоднородности в наибольшей степени проявляются в одинаковых погодных условиях.

В отличие от локальных измерений на МС, инфракрасные изображения городов со спутников позволяют одновременно охватить значительную площадь. В районах, плохо освещённых метеорологическими наблюдениями, тепловые снимки со спутника становятся фактически единственным способом обнаружения ГОТ. Так как источником информации в данном методе исследования является тепловое излучение подстилающей поверхности, говорят о поверхностном ГОТ. Характеристики ГОТ в поле температуры поверхности и в поле температуры приземного слоя воздуха существенно различаются, особенно днём в условиях солнечного нагрева (*таблица*). Несмотря на эти различия, они находятся в тесной связи (Urban et al., 2013), что и обуславливает широкое применение ИК-изображений для изучения городского микроклимата.

Основные характеристики поверхностного и атмосферного городского острова тепла (по материалам (U. S. Environmental..., 2008))

Характеристики	Поверхностный ГОТ	ГОТ
Время появления	Существует всегда (днём и ночью). Наиболее интенсивен в дневные часы и летом	Может быть небольшим или отсутствовать в дневные часы. Наиболее интенсив ночью или на рассвете и зимой
Максимальная интенсивность и её вариации по территории города	Днём от 10 до 15 °С, ночью от 5 до 10 °С. Большие пространственные и временные вариации	Днём от –1 до 3 °С, ночью от 7 до 12 °С. Небольшие вариации
Методы обнаружения	Дистанционное зондирование (тепловые снимки)	Прямые метеорологические измерения

Интенсивность теплового излучения над городскими территориями выше естественного фона, и городам на ИК-изображениях в целом соответствует положительная тепловая аномалия, наиболее выраженная над активно действующими промышленными предприятиями, промзонами, районами с плотной жилой застройкой. Однако количественное значение этой аномалии, определяемое по отношению к окружающей сельской местности, не всегда характеризует масштаб антропогенного воздействия на тепловой режим территории (ГОТ).

На *рис. 1* (см. с. 27) представлено распределение зимней температуры воздуха в Ханты-Мансийске по данным космических снимков. Положительная аномалия в городе (до 4 °С) на порядок превышает характерное значение ГОТ, рассчитанное по 56 крупнейшим городам Европы в зимний период: $0,4 \pm 0,4$ °С (Peng et al., 2011). При сопоставлении данного изображения с топографической картой выясняется, что город расположен на приподнятом участке местности и наблюдается значительный (~100 м) перепад высот (от 18 до 118 м над уровнем моря (н.у.м.)), причём наиболее высокая часть города одновременно оказывается и самой тёплой.

В климатологии хорошо известно, что зимой (а ночью — во все сезоны) при установлении тихой и ясной погоды верхние части холмов характеризуются более высокими температурами (как воздуха, так и почвы) за счёт стока холодного воздуха вниз. Согласно таблицам микроклиматической изменчивости показателей тепловых ресурсов (Мищенко, 1984), в Сибири на территориях с базисом эрозии (перепадом высот) $\Delta H \approx 50\text{--}150$ м температура воздуха самого холодного месяца на вершинах в среднем на 3–4 °С выше, чем на окружающей равнине. В реальной ситуации в зависимости от погоды разность температур будет меняться в широком диапазоне: от 0 °С, например в случае сильного ветра и сплошной облачности, до 4–5 и даже 8–12 °С при появлении стоковых течений (Гольцберг, 1967).

Рис. 1. Температура поверхности (городской остров тепла) в Ханты-Мансийске (слева) по данным измерений MODIS за 15-летний период (Davy, Esau, 2016) и рельеф города (справа)

Рис. 2. Температура воздуха (1) и температура поверхности асфальта (2); Мурманская обл., 2016 г.

Если влияние холмистого рельефа на температуру воздуха и почвы хорошо изучено, оценить, как он отражается в характере теплового излучения искусственных городских поверхностей, особенно при наличии внутренних антропогенных источников тепла, намного сложнее. Вместе с тем есть основания предполагать, что в периоды с отрицательным радиационным балансом оно также в той или иной степени содержит информацию об окружающем микроклимате из-за теплообмена этих поверхностей с окружающим воздухом и неодинаковых условий для излучения в разных элементах рельефа. Для иллюстрации на рис. 2 показаны значения температуры воздуха и поверхности дорожного покрытия, измеряемые каждые 30 мин автоматической дорожной МС, установленной на одном из участков трассы Р-21 «Кола» на территории Мурманской области: зимой и ночью вариации достаточно синхронны. Существует также корреляция между температурой кровельных поверхностей и температурой воздуха (Воронин, Орлов, 2008). В жаркий солнечный день кровля зданий нагревается до температур, значительно превышающих температуру окружающего воздуха, обеспечивая,

наряду с высокой температурой других городских поверхностей, высокий поверхностный ГОТ. При отсутствии солнечного излучения она быстро теряет тепло из-за интенсивного на уровне крыш турбулентного обмена, и её температура приближается к температуре окружающего воздуха (ГОТ в температуре воздуха и в температуре поверхности ночью близки по величине (см. таблицу)).

Не подлежит никакому сомнению, что рельеф вносит заметный вклад в формирование положительной тепловой аномалии на территории Ханты-Мансийска. Если исходить из данных, приведённых на *рис. 3*, где в виде бокс-диаграммы показаны разности температуры воздуха и температуры поверхности асфальта между автоматическими дорожными МС в Мурманской области, одна из которых установлена в верхней части холма (210 м н.у.м.), а вторая — на прилегающей к нему равнине (135 м н.у.м.), обусловленные рельефом аномалии могут достигать многих градусов. Следует отметить, что статистика на *рис. 3* получена по всему ряду измерений, включая периоды с осадками, облачностью и сильным ветром, а следовательно, средние значения разностей только в малооблачные периоды, когда возможно получение ИК-изображения со спутников, будут ещё больше.

Если при расчёте тепловой аномалии в больших городах применять осреднение температуры по площади, можно рассчитывать, что микроклиматические неоднородности отдельных участков будут сглажены. Наиболее критичным игнорирование микроклимата оказывается в случае небольших городов: в силу компактности они могут оказаться на территории с иным микроклиматом, чем окружающая их сельская местность. Наглядный пример — Апатиты, практически полностью находящиеся в средней и верхней части холма, возвышающегося на 20–70 м над равниной. В отдельные моменты разность температуры воздуха в городе и его пригородах достигает 10–15 °С зимой и 6–8 °С летом в ночные часы (Демин и др., 2017). Если игнорировать особенности местоположения и объяснять возникновение положительной аномалии температуры в городе исключительно антропогенными факторами, можно прийти к заключению о существовании на территории с площадью около 3,5 км² (вместе с парками), где отсутствуют промышленные предприятия, ГОТ с максимальной интенсивностью, равной (и превышающей!) значениям ГОТ крупнейших мегаполисов мира. В действительности температура воздуха в городе даже в периоды сильно выраженной аномалии не превышает значений, фиксируемых в верхней части фонового холма (Демин и др., 2017).

Большая часть сибирских городов появилась вблизи рек, обеспечивавших при отсутствии дорог водную транспортную связь с остальными территориями. Так как территория Западной Сибири представляет собой низменную равнину с довольно плоским рельефом и во время паводков значительные пространства оказываются под водой (например, пойма реки Обь в среднем течении достигает 20–30 км и более), угроза затопления в той иной степени существует для многих населённых пунктов региона. Единственная возможность избежать её — располагать города на приподнятых участках местности.

Ноябрьск, где обнаружен ГОТ (Esau, Miles, 2016; Esau et al., 2018), первоначально существовал в виде рабочего посёлка вокруг железнодорожной станции (нынешний Ноябрьск-1). Однако позже проектировщики отметили низинное положение, и, чтобы обезопасить будущее городское поселение от половодий, перенесли строительство на соседнюю возвышенность.

Рис. 3. Разность температуры (1 — температура воздуха, 2 — температура дорожного покрытия (асфальт)) между автоматическими дорожными МС в верхней части холма и на прилегающей равнине зимой (XII–II) и ночью (23:00–05:00) в тёплое время года (V–IX) в 2016–2017 гг.; Мурманская обл., разность высот между МС — 75 м

Наиболее высокая часть острова, образованного реками Обь и Юганская Обь, была выбрана и для будущего Нефтеюганска (ГОТ подробно рассмотрен в работе (Esau et al., 2018)). Выяснилось, что это единственное место в районе, пригодное для строительства. Пригороды, оказавшиеся в пойменной зоне, подвергаются регулярному затоплению (рис. 4).

Рис. 4. Нефтеюганск во время паводка, июнь 2015 г. (фото Андрея Селезнёва)

Относительные высоты значительной части Западно-Сибирской равнины часто не превышают нескольких десятков метров. Если при изучении ГОТ игнорируется холмистый рельеф с выраженным перепадом высот в 100 м (см. выше пример с Ханты-Мансийском), не стоит удивляться тому, что слабовсхолмленные участки принимают за плоскую равнину. Например, в работе (Esau et al., 2018) возможный вклад рельефа в микроклимат Нефтеюганска просто не рассматривается, так как разности высот между наиболее высокой частью города и его пригородами не превышают 20 м. Такой подход не может не вызвать удивления, так как зимние и ночные температуры очень чувствительны даже к незначительным изменениям форм рельефа, а создаваемые перераспределением холодного воздуха микроклиматические неоднородности по своей величине сопоставимы и даже превышают значения ГОТ крупнейших городов мира.

На рис. 5 (см. с. 30) показана связь температур на двух МС в центре Кольского п-ова, удалённых друг от друга менее чем на 4 км, разность высот между которыми составляет 20 м (155 и 135 м н.у.м.). При интенсивном турбулентном перемешивании (летом в дневные часы или при ветре более 3 м/с) значения на обеих МС оказываются почти одинаковыми и на графике точки размещаются примерно вдоль прямой $y = x$. Иная картина наблюдается ночью и зимой при слабом ветре и ясном небе. Так как «нижняя» МС (135 м н.у.м.) расположена в обширной орографической депрессии, где накапливается холодный воздух и формируется «озеро холода», её температура ниже: точки на рис. 5 систематически отклоняются в одну сторону от прямой $y = x$. Величина этого отклонения зависит от метеорологических условий, определяющих интенсивность радиационного выхолаживания (количества и типа облачности,

влажности, скорости и направления ветра и т. д.), и может достигать 3–5 °C летом и 10–12 °C зимой. Возникновению больших неоднородностей зимой способствует продолжительный период с отрицательным радиационным балансом (полярная ночь), когда при установившейся антициклонической погоде выхолаживание может продолжаться на протяжении многих дней.

Рис. 5. Связь температуры воздуха на МС, расположенных на разных высотах (135 и 155 м н. у. м.) в 15:00 (1) и 03:00 (2)

По результатам измерений на агрометеорологическом полигоне в Литве в условиях очень выровненного участка с перепадом высот менее 30 м характерный диапазон вариаций минимальной температуры при тихой ясной погоде составляет 6–7 °C, а полный диапазон температурных различий, обусловленных рельефом, достигает 9 °C (Каушила, 1970). Как показано в работе (Суханов, 1949), на территории Башкирии в тёплую и ясную погоду минимальные температуры на холме в среднем на 5 °C выше, чем в долине, при разности высот всего 26 м, а в отдельных случаях разности превышали 9 °C. В феврале различия в тихую ясную погоду составляли в среднем 7–8 °C, доходя в отдельных случаях до 12 °C.

Приведённые примеры наглядно показывают, что пренебрежение даже относительно небольшими вариациями рельефа в 10–30 м, которые наблюдаются практически во всех городах, не имеет физического обоснования.

С началом хозяйственного освоения районов Сибири и Крайнего Севера были выработаны специальные градостроительные рекомендации, согласно которым в регионах с сильными морозами при выборе площадок для новых городов «следует избегать понижений рельефа, где накапливается холодный воздух... Непременным условием выбора должна явиться возможность стока охлаждённого воздуха с территории населённого места и, желательно, отсутствие или минимум поступления холодного воздуха с вышерасположенных участков» (цит. по (Справочник..., 1977)). Таким местоположениям соответствуют участки на верхней трети склонов (возвышенности, песчаные гряды, крутые берега рек). Важно также, что эти же самые участки, выбранные из климатических соображений, будучи образованными аллювиальными отложениями, оказываются одновременно и наиболее удобными для строительства зданий и промышленных объектов, так как позволяют избежать сложностей, связанных с ведением работ на заболоченных и переувлажнённых грунтах (Инженерная..., 1976; Справочник..., 1977). При учёте данных рекомендаций территория ещё до появления города

оказывается теплее окрестностей по естественным причинам. Если вклад естественных процессов не рассматривать, а обнаруженные тепловые аномалии интерпретировать исключительно как антропогенный эффект, интенсивность ГОТ необоснованно завышается.

К сожалению, при изучении микроклимата не удастся ограничиться сопоставлением ИК-снимков только с топографической картой: на одной и той же высоте температура воздуха и другие показатели термического режима при прочих равных условиях бывают различными. Это вызвано тем, что в холмистой местности с относительными перепадами высот до 100–150 м микроклиматические вариации температуры создаются не различиями в высотах отдельных участков, а неоднородностями подстилающей поверхности (теплофизические свойства почв, типы растительности, близость к водоёмам, наличие болот и т. д.) и формами рельефа (Гольцберг, 1967). Зимой при замерзании водоёмов и установлении снежного покрова на первый план выходят формы рельефа, определяющие условия радиационного выхолаживания и накопления холодного воздуха.

По наблюдениям на болотном полигоне «Мухрино» (Ханты-Мансийский край), зимой средние температуры воздуха над поверхностью гряды и на находящейся в 20–30 м от неё мочажине (ложбине) при разности высот 30–50 см фактически не различаются (Демин, Заров, 2018). Однако при сильном радиационном выхолаживании, когда температура падает ниже $-20...30^{\circ}\text{C}$, разность температур увеличивается до $2...2,5^{\circ}\text{C}$. Это говорит о том, что зимой в условиях континентального климата Сибири, обостряющего микроклиматические различия, термические неоднородности могут существовать даже над очень выровненной территорией с относительными перепадами высот менее 1 м (предположительно, из-за разной интенсивности турбулентного обмена над выпуклыми и вогнутыми формами рельефа).

Для будущего Надыма среди сильно заболоченной территории было выбрано сухое возвышенное место, позволявшее подготовить взлётно-посадочную полосу и облегчавшее строительные работы, — останцы надпойменной террасы с песчаными почвами. Здесь существовал особый микроклимат, так как суходолы и болота значительно различаются по условиям термического режима. Песчаные почвы относятся к категории тёплых, в то время как обводнённые болотные из-за высокой теплоёмкости и малой теплопроводности в тёплое время года являются наиболее холодными. В ясные тихие ночи все сырые болотные участки оказываются значительно холоднее прилегающих суходолов, и севернее $55\text{--}56^{\circ}\text{с.ш.}$ на почве возможны сильные заморозки в течение всего лета (Гольцберг, 1967; Романова и др., 1983). Более низкая над болотами и температура воздуха. На территории Нечерноземья в период с мая по сентябрь в ясные тихие ночи на высоте 2 м суходолы теплее окружающих болот в среднем на 4°C , а в отдельные ночи это различие увеличивается до 7°C (Романова и др., 1983).

В зимнее время следует учесть также приподнятое по отношению к окружающей местности положение города. Согласно топографическому плану отдела Архитектуры администрации муниципального образования Надымского района, наибольшая отметка в городе составляет 18 м, а наименьшие — 12 м (уровень оз. Янтарное).

Территория, на которой появился Надым, уже изначально была теплее окружающих болот. В процессе городского строительства и жизнедеятельности возник антропогенный ГОТ, который усилил существующий термический контраст. При расчёте интенсивности ГОТ температура в городе должна сопоставляться с температурой не в его ближайших окрестностях, а на суходоле, схожем с тем, что ранее существовал на месте Надыма.

Метод изучения ГОТ посредством анализа ИК-изображений называют дистанционным, так как результаты зондирования со спутников доступны через сеть Интернет и, на первый взгляд, нет необходимости в личном присутствии на месте исследования. Однако из-за искажающего влияния микроклимата данный метод, по всей видимости, следует рассматривать как важный, но только первый этап работы, на котором могут быть выявлены участки с различными аномалиями температуры на территории города и его окрестностях. По механизмам своего возникновения ГОТ — явление исключительно антропогенное. При игнорировании микроклимата можно уверенно говорить только об обнаружении в городах положительной тепловой аномалии. Ответ на вопрос, какой количественный вклад в её значение вносит именно ГОТ, требует проведения дополнительных микроклиматических изысканий.

Литература

1. Воронин А. М., Орлов Ю. Н. Факторы, влияющие на температуру поверхности плоских кровель // Кровельные и изоляционные материалы. 2008. № 4. С. 56–59.
2. Гольцберг И. А. Микроклимат СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 282 с.
3. Демин В. И., Заров Е. А. Микроклиматические вариации температуры воздуха в условиях слабо-всхолмленного рельефа // Physics of Auroral Phenomena. 2018. Т. 41. С. 179–182.
4. Демин В. И., Козелов Б. В., Елизарова Н. И., Меньшов Ю. В. Влияние микроклимата на точность оценки городского «острова тепла» // Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 2017. Вып. 584. С. 74–93.
5. Инженерная геология СССР. В 8-ми т. Т. 2. Западная Сибирь / под ред. Сергеева М. С. М.: Изд-во Московского ун-та, 1976. 498 с.
6. Каушила К. А. К вопросу о территориальном распределении и годовом ходе различий минимальной температуры воздуха, обусловленных рельефом // Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 1970. Вып. 264. С. 90–96.
7. Мищенко З. А. Биоклимат дня и ночи. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 280 с.
8. Романова Е. Н., Мосолова Г. И., Берсенева И. А. Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 246 с.
9. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах. Л.: Стройиздат, 1977. 552 с.
10. Суханов Д. В. К вопросу об особенностях термического режима низин и лесных полей // Тр. Гл. геофиз. обсерватории. 1949. Вып. 15(77). С. 3–73.
11. Davy R., Esau I. Differences in the efficacy of climate forcings explained by variations in atmospheric boundary layer depth // Nature Communications. 2016. V. 7. Article No. 11690.
12. Esau I., Miles V. Warmer urban climates for development of green spaces in northern Siberian cities // Geography. Environment. Sustainability. 2016. V. 9. No. 4. P. 48–62.
13. Esau I., Miles V., Varentsov M., Konstantinov P., Melnikov V. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate // Theoretical and Applied Climatology. 2019. V. 137. P. 2513–2528. URL: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02754-z>.
14. Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands in Northern West Siberian Cities // Remote Sensing. 2017. V. 10. Iss. 9. Article No. 989.
15. Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Ottle C., Breon F.-M., Nan H., Zhou L., Ranga M. B. Surface urban heat island across 419 global big cities // Environmental Science and Technology. 2011. V. 46. No. 2. P. 696–703.
16. U.S. Environmental Protection Agency. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. Draft. 2008. URL: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium/>.
17. Urban M., Eberle J., Hüttich C., Schmullius C., Herold M. Comparison of satellite-derived land surface temperature and air temperature from meteorological stations on the pan-arctic scale // Remote Sensing. 2013. V. 5. Iss. 5. P. 2348–2367.

Role of antropogenic and natural drivers in estimation of urban heat island

V. I. Demin

*Polar Geophysical Institute, Apatity 184209, Russia
E-mail: demin@pgia.ru*

Thermal anomalies in cities (urban heat island) caused by man-made processes should be distinguished from natural microclimatic heterogeneities in the temperature field. Significant spatial variability in the thermal characteristics occurs even in flat terrain with small changes in elevation. It develops due to unequal conditions for the drainage and accumulation of cold air in different forms of relief or between areas with different properties of the underlying surface. Natural microclimatic temperature variations cannot be ignored in studies of the technogenic impact on the thermal regime of terrain as they are comparable and even exceed the values of urban heat island intensities of world largest cities and megacities. For example, many West Siberian cities were built on the uplands to avoid the risk of flooding and construction on water-saturated soils. These places were originally warmer than surrounding wetlands because cold air drainage and drier soil. Anthropogenic activity increased

the temperature contrast that existed earlier. The urban heat island intensity would be unjustifiably overstated if positive temperature anomaly in cities were considered having solely anthropogenic origin. Correct estimation of the urban heat intensity can only be obtained through temperature comparison in urban and rural areas under similar microclimatic conditions.

Keywords: microclimate, urban climate, urban heat island, remote sensing

Accepted: 01.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-25-33

References

1. Voronin A. M., Orlov Yu. N., Faktory, vliyayushchie na temperaturu poverkhnosti ploskikh krovel' (Affecting factors for the surface temperature of flat roofs), *Krovel'nye i izolyatsionnye materialy*, 2008, No. 4, pp. 56–59.
2. Goltsberg I. A., *Mikroklimat SSSR* (Microclimate of USSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967, 282 p.
3. Demin V. I., Zarov E. A., Mikroklimaticheskie variatsii temperatury vozdukha v usloviyakh slabovskholmlennogo rel'efa (Microclimatic air temperature variation over indistinct hilly terrain), *Physics of Auroral Phenomena*, 2018, Vol. 41, pp. 179–182.
4. Demin V. I., Kozelov B. V., Elizarova N. I., Menshov Yu. V., Vliyanie mikroklimata na tochnost' otsenki gorodskogo "ostrova tepla" (Microclimate influence on accuracy of the urban heat island estimation), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, 2017, Vol. 584, pp. 74–93.
5. *Inzhenernaya geologiya USSR. T. 2. Zapadnaya Sibir'* (Engineering geology of USSR. Vol. 2. West Siberian), Moscow: Moscow State University, 1976, 495 p.
6. Kaushila K. A., K voprosu o territorial'nom raspredelenii i godovom khode razlichii minimal'noi temperatury vozdukha, obuslovlennykh rel'efom (On territorial distribution and the annual course of the minimum air temperature differences due to the relief), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, 1970, Vol. 264, pp. 90–96.
7. Mishchenko Z. A., *Bioklimat dnya i nochi* (Daytime and nighttime bioclimate), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 280 p.
8. Romanova E. N., Mosolova G. I., Berseneva I. A., *Mikroklimatologiya i ee znachenie dlya sel'skogo khozyaystva* (Microclimate and its significance for agriculture), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 246 p.
9. *Spravochnik po stroitel'stvu na vechnomerzlykh gruntakh* (Handbook of construction on permafrost), Leningrad: Stroiizdat, 1977, 552 p.
10. Sukhanov D. V., K voprosu ob osobennostyakh termicheskogo rezhima nizin i lesnykh polyan (On features of the thermal regime of lowlands and forest glades), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii*, 1949, Vol. 15(77), pp. 3–73.
11. Davy R., Esau I., Differences in the efficacy of climate forcings explained by variations in atmospheric boundary layer depth, *Nature Communications*, 2016, Vol. 7, Article No. 11690.
12. Esau I., Miles V., Warmer urban climates for development of green spaces in northern Siberian cities, *Geography. Environment. Sustainability*, 2016, Vol. 9, No. 4, pp. 48–62.
13. Esau I., Miles V., Varentsov M., Konstantinov P., Melnikov V., Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate, *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, Vol. 137, pp. 2513–2528, available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02754-z>.
14. Miles V., Esau I., Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands in Northern West Siberian Cities, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, Issue 9, Article No. 989.
15. Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Ottle C., Breon F.-M., Nan H., Zhou L., Ranga M. B., Surface urban heat island across 419 global big cities, *Environmental Science & Technology*, 2011, Vol. 46, No. 2, pp. 696–703.
16. U. S. Environmental Protection Agency, *Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. Draft*, 2008, <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
17. Urban M., Eberle J., Hüttich C., Schmullius C., Herold M., Comparison of satellite-derived land surface temperature and air temperature from meteorological stations on the pan-arctic scale, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, Issue 5, pp. 2348–2367.