

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТРОВА ТЕПЛА ЯКУТСКА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ ТЕРМИЧЕСКИХ МИКРОДАТЧИКОВ

П.И. Константинов¹, А.А. Семенова², У.И. Антипина³, М.А. Тимофеев⁴, Н.И. Тананаев⁵

^{1,2} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра метеорологии и климатологии

³ Институт физики атмосферы РАН имени А.М. Обухова

^{4,5} Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова

¹ Доц., канд. геогр. наук; e-mail: kostadini@mail.ru

² Аспирант; e-mail: mos7kit@mail.ru

³ Мл. науч. сотр., аспирант; e-mail: ant.uly@yandex.ru

⁴ Инженер-исследователь; e-mail: m.a.timofeev@s-vfu.ru

⁵ Зав. лабораторией, доц., канд. геогр. наук; e-mail: tanni@s-vfu.ru

В настоящей работе описываются результаты микроклиматического эксперимента по изучению термической структуры города Якутска с помощью самостоятельной развернутой сети термических датчиков TZONE. С ее помощью город и ближайшие пригороды были охвачены измерительной инфраструктурой, состоящей из 18 единиц датчиков на двухмесячный срок во второй половине лета 2024 г. В результате полученные данные однозначно указывают на образование в Якутске летней температурной аномалии, которая может быть классифицирована как «летний остров тепла», интенсивность которой в ночные часы (диагностический признак острова тепла) достигает 2,5–3,6°C. Среднее же значение острова тепла для всего летнего периода может быть оценено в пределах 1,3–1,6°C. Также отмечается значительная неоднородность в суточном ходе температуры внутри города и в фоновой зоне, что, скорее всего, связано с различиями в режиме нагрева приземного слоя воздуха вследствие дифференцированного прихода прямой солнечной радиации (большая открытость «фоновых» площадок солнечным лучам).

Ключевые слова: микроклимат города, полярные регионы, арктические города, экспериментальные измерения, региональные особенности климата

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.5.9

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в арктическом регионе и в высоких широтах скорость изменения климата выше, чем в среднем по планете. Этот эффект называется арктическим усилением [Davy et al., 2018]. Среднегодовая температура поверхности в Арктике с 1971 по 2017 г. выросла на 3,1°C зимой и на 1,8°C летом [АМАР, 2019]. Положительные последствия потепления Арктики: круглогодичное освобождение Северного морского пути ото льда и повышение комфорта проживания населения и развития экономики [Semenova et al., 2019]. Негативными последствиями, которые сильно повлияют на климат и жизнь людей, можно назвать следующие: изменение природных зон и возникновение необычных для данной территории заболеваний, снижение альбено поверхности из-за сокращения ледового покрова моря, увеличение потоков CO₂ из почвы в атмосферу, таяние вечной мерзлоты [Biskaborn et al., 2019, Harsh et al., 2009, Kinnard et al., 2011, Sitch et al., 2007]. Имеется много доказательств того, что вечная мерзлота ослабляет несущую способ-

ность грунта. Она разрушает арктическую инфраструктуру: дороги, здания, промышленные объекты [Shiklomanov et al., 2016; Hjort et al., 2018]. Разрушение домов может привести к миграции населения в более низкие широты.

При этом большая часть зданий в городах Арктики строилась, когда еще не было достаточной информации о микроклиматических параметрах города. Одним из главных эффектов влияния города на термический режим является городской остров тепла (UHI), т. е. область устойчивой положительной аномалии приземной температуры воздуха внутри города, по сравнению с пригородом [Oke, 1982]. Это явление трехмерное и может оказывать комплексное влияние на территорию [Oke et al., 2017; Fan et al., 2018]. Например, положительные аномалии температуры видны и в деятельном слое почвы [Lokoshchenko, Korneva, 2015] и в грунтовых водах [Benz et al., 2016]. В последнем докладе IPCC подтверждается влияние городов на окружающую среду [IPCC, 2019]. При этом потепление климата Арктики может повышать температуру воздуха в

арктических городах [Lappalainen et al., 2016; Esau et al., 2016].

В летний период остров тепла может усиливать тепловой стресс в городах низких широт [Wouters et al., 2017]. Но в арктических городах, благодаря изменению климата, в среднем проживание становится более комфортным [Semenova et al., 2019]. Однако, потепление летних сезонов, в том числе волны тепла, могут оказывать существенное влияние на экосистемы и население Арктики, к которому они могут быть не готовы.

На данный момент существует много подробных и комплексных работ об изучении микроклимата города в низких и средних широтах [Baklanov et al., 2004; Peng et al., 2012; Piringer et al., 2007; Wienert, Kuttler, 2005; Zhao et al., 2014]. Однако для городов Заполярья таких исследований практически не проводилось.

Одна из первых попыток изучить микроклимат холодного высокотропного города описана в работе [Bowling, Benson, 1978]. Bowling S.A. и Benson C.S. в 1974–1976 гг. провели первое инструментальное измерение острова тепла и приземных температурных инверсий в городе Фэрбанкс на Аляске. Для измерений использовались регулярные данные метеостанции и мобильные термопары, которые измеряли приземную температуру во время их перемещений по городу на автомобиле. Таким образом было получена информация о распределении приземных температур в городе около него. Измерения показали, что уже в 1970-х гг. даже в небольшом городе при преобладании подходящих атмосферных условий может существовать мощный городской остров тепла. Предполагалось, что во время данного исследования главными причинами образования острова тепла являлись последствия искусственного нагрева города (антропогенного тепла), так как из-за низкой высоты солнца в холодное время года, низкой инсоляции и устойчивого снежного покрова, тепловой баланс и альбедо существенно не менялись, а очень низкие скорости ветра свели к минимуму эффект шероховатости поверхности. В ходе нескольких серий инструментальных измерений было обнаружено, что в зимний период наблюдаемый устойчивый тепловой остров при низком балле облачности и при низких скоростях ветра в среднем был равен 10–11°C, при этом его максимальные значения достигали 14°C. Вероятно, такие высокие значения связаны в том числе и с приземными инверсиями. Также было установлено, что в летние ночи интенсивность острова тепла может быть сопоставима с зимними дневными значениями. При этом эффект острова тепла существенно ослабевает в период с марта по сентябрь, за исключением короткого периода в конце весны,

когда в городе уже отсутствует снежный покров, а на фоновой территории таяние снега еще продолжается [Bowling, Benson, 1978].

В те же годы вышла первая отечественная работа «Климат Якутска» о попытках изучения климата одного из самых холодных городов мира [Швер, Изюменко, 1982]. В работе описаны эксперименты в 1976–1978 гг. в Якутске. В течение четырех сезонов были проведены периодические измерения в центре города с помощью данных местной телевизионной мачты и временного метеопоста, а также с метеостанции, располагающейся на окраине города, а также проводились синхронные микроклиматические съемки. Результаты показали, что зимой как при тихой ясной погоде, так и с при наличии морозного тумана в городе, термические различия между окраиной и центральной частью города составляют 1,0–3,0°C с максимумом до 4–6°C, между городом и пригородом 1,5–4,0°C с максимумом в утренние часы. Таким образом, измерения выявили наличие острова тепла в Якутске. Температурные контрасты зависят от характера погоды и синоптической ситуации: они усиливаются при ясной и безветренной погоде. При облачной и ветреной погоде распределение метеоэлементов на территории города становится более однородным [Швер, Изюменко, 1982]. Следует отметить, что в данной работе [Швер, Изюменко, 1982] отсутствует четкая информация о метеорологических приборах и их точности, используемой для измерения.

Также была оценена разница температуры между Якутском и сельскими (условно фоновыми) метеостанциями, находящимися в 12–150 км от города отдельно за каждое десятилетие с 1939 по 1978 г. Анализ данных показал, что температура воздуха в городе постепенно повышалась по сравнению с соседними пунктами. Это объясняется ростом города и развитием промышленных предприятий. Наибольшая разница температур приходилась на самые холодные месяцы. За 38 лет температура в Якутске повысилась на 1,0–1,9°C зимой, и на 0,3–0,4°C – в теплый период. Это связано с наибольшей повторяемостью антициклонических погод зимой и с антропогенным теплом. Летом температурные контрасты слаживаются в связи с увеличением циклического типа погоды и усилением ветра [Швер, Изюменко, 1982].

В работе [Magee et al., 1999] сопоставлялись прямые данные измерений с метеостанции аэропорта Фэрбанкс, с измерениями на фоновой метеостанции, расположенной в сельской местности. Изучение острова тепла города Фэрбанкс за период с 1949 по 1997 г. дало представление о его среднесезонной и среднесуточной динамике. Установлено, что среднегодовой остров тепла в городе почти за 50 лет

вырос на 0,4°C, причем в холодный период его мощность увеличивалась интенсивнее. На рубеже веков изучались остов тепла в прибрежном городе Барроу на Аляске [Hinkel et al., 2003] и в Рейкьявике [Steinecke et al., 1999]. Исследование городского микроклимата и городского загрязнения в городах южной Финляндии представлено в работах [Järvi et al., 2009; Hjort et al., 2016].

В России изучение островов тепла особенно актуально, поскольку в стране много городов с холодным континентальным климатом, а в Арктической зоне около 85% населения проживает в городах. Первые данные *in situ* по российским арктическим городам были собраны в 2014 г. в городах Апатиты [Konstantinov et al., 2014] и Норильск [Варенцов и др., 2014]. Согласно этим исследованиям, в Норильске и Апатитах разница температур между центром города и прилегающими территориями зимой составляет в среднем 1–1,5°C, а максимальные значения достигают 5–7°C. Через несколько лет с помощью сети UHIARC были собраны натурные данные в нескольких арктических городах России: Апатиты, Салехард, Воркута, Новый Уренгой и Надым [Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018]. Эти исследования позволили получить непрерывные измерения температуры воздуха в городах в течение зимнего сезона за период с 2015 по 2022 г.

Остров тепла в Якутске был отмечен в работе П.И. Константина и А. Кукановой об островах тепла в городах России, где рассматривался период станционных измерений только с 2000 по 2012 г. Было выявлено, что случаи экстремальных значений островов тепла наблюдаются при антициклональном поле давления, чаще всего в центре антициклона и составляют до 13–15°C. В работе был обнаружен типичный суточный ход острова тепла и выявлены закономерности его сезонной динамики [Константинов, Куканова, 2014].

Исследования городского острова тепла требуют синхронного измерения как минимум с пары станций, которые расположены внутри и за пределами каждого города [Mishra et al., 2015]. Поверхностный остров тепла (SUHI) удобен для спутникового мониторинга с помощью тепловых снимков поверхности [Voogt, Oke, 2003; Zhou et al., 2018], тогда как стандартный остров тепла необходимо измерять с помощью приборов *in situ*.

Города Сибири хорошо изучены также с помощью дистанционных измерений [Варенцов и др., 2014; Esau et al., 2016, 2019; Miles et al., 2017]. В некоторых городах Западной Сибири, например, в Ханты-Мансийске положительная аномалия температуры в городе (до 4°C) на порядок превышает подобные значения, рассчитанное для 56 крупнейших городов Европы в зимний период [Miles et al.,

2017; Peng et al., 2011]. Попытка оценить тепловые аномалии в Якутске с помощью тепловых снимков представлена в работе Стручковой с соавторами [Стручкова и др., 2023].

Даже для условий полярной ночи в Арктике спутниковые данные успешно могут быть использованы для дешифрирования поверхностного острова тепла (SUHI) и могут быть дополнением прямых измерений интенсивности острова тепла. Но тепловые снимки не могут полностью заменить измерения, так как для каждого отдельного случая необходима верификация спутниковых данных на каждом конкретном объекте [Варенцов и др., 2014].

Поэтому необходимы экспедиционные исследования, а также установка в городах большего числа датчиков и/или метеостанций. Это позволит получить надежные данные о современном климате городов. В связи с этим основной целью данного исследования является получение информации о пространственно-временной динамике острова тепла экстремально-холодного города Якутска в летний сезон, ведь остров тепла считается преимущественно летним явлением [Oke, 1982].

Природные условия территории и их изменения. Якутск является одним из самых быстрорастущих городов России, за последние 20 лет население выросло примерно на 150 тыс. человек, за последние четыре года примерно на 50,5 тыс. человек [Республика..., 2025] и город значительно увеличился по площади. Официально Якутск не относится к Арктической зоне РФ, но относится к районам крайнего севера, несмотря на то что климат в нем не менее экстремальный, и температура зимой может опускаться до –50...–60°C [Швер, Изюменко, 1982]. В летнее время наблюдается длительный период «белых ночей», а в декабре светлое время суток длится всего 3–4 часа.

Якутск, имеющий площадь в 122 км² и население 389 тыс. человек на 2024 г. [Республика..., 2025], является самым крупным городом на планете, расположенным в зоне многолетней мерзлоты. Город расположен в равнинной местности, на берегу реки Лены (на одной из ее проток). На территории города и около него имеется много озер и стариц. Климат Якутска обусловлен его нахождением в высоких широтах с соответствующим радиационным и циркуляционным режимом. Согласно классификации Б.П. Алисова, Якутск находится в экстремально резко-континентальном климате. Континентальность климата обусловлена тем, что территория Якутска удалена от всех океанов и защищена возвышеностями и горами, препятствующими свободному доступу морских воздушных масс. Погоду преимущественно определяет Азиатский максимум, преобладают континентальные умеренные и арктические

воздушные массы [Швер, Изюменко, 1982]. Осадков выпадает мало, всего 230 мм/год с максимумом летом. Ветер слабый, большая повторяемость штилей. Средняя годовая скорость ветра в Якутске 2,4 м/с. По сравнению с городами, расположенными на той же широте, зимой преобладают экстремально низкие температуры, средняя температура января -37°C , но температура может опускаться и до -60°C , как и было отмечено ранее. Зима в Якутске продолжительная, очень холодная и малоснежная, а лето короткое, сравнительно жаркое и засушливое. Средняя температура июля $+19,9^{\circ}\text{C}$ [Климатические нормы..., 2024].

Центр Якутска имеет радиально-кольцевую структуру города, но при этом город вытянут вдоль поймы реки Лены. Река ограничивает город с северо-востока по юго-восток. Частая сетка улиц образует значительное количество небольших по площади кварталов. Якутск плотно застроен среднеэтажными жилыми домами в 5–9 этажей с централизованным отоплением. Преобладающей локальной климатической зоной (LCZ) во всех городах является

открытая среднеэтажная зона (LCZ 5) [Stewart, Oke, 2012]. В Якутске также встречаются зона тяжелой промышленности (LCZ 10), плотная малоэтажная застройка (LCZ 6) и открытая малоэтажная с искусственными покрытиями (LCZ 8). Перепады высот в городе не превышают нескольких метров. Из-за наличия многолетней мерзлоты Якутск построен на сваях, что позволяет теплу от зданий не нагревать грунт под ними, а коммуникации выведены наружу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения летнего острова тепла в городе Якутске была установлена сеть из 18 предварительно прошедших поверку температурных датчиков (Temperature Data Logger) модели TZ-TempU02. Для оценки пространственной динамики острова тепла датчики устанавливались равномерно по городу и доступным пригородам вокруг него на высоте около 2 м (рис. 1). Измерения проводились с 25 июля по 5 сентября 2024 г., таким образом были получены непрерывные ряды данных за 41 сутки для каждой точки сети с частотой в 10 минут.

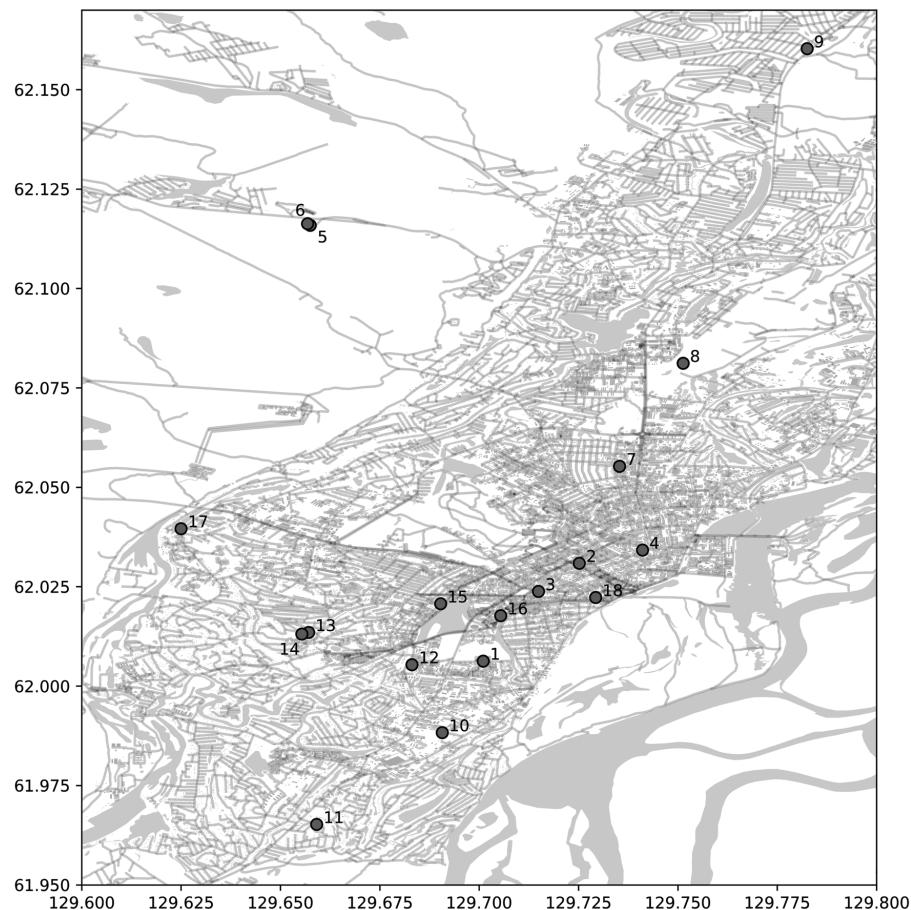


Рис. 1. Схема расположения термических датчиков в пределах г. Якутска (сеть измерений)

Fig. 1. Scheme of thermal microsensors location within the town of Yakutsk (measurement network)

Регистратор данных температуры (TDL) TZ-TempU02 является одним из видов регистраторов данных холодовой цепи TZONE. В основном он используется для регистрации температуры при хранении и транспортировке продуктов питания, лекарств, химикатов и других товаров. TDL имеет внутренний термистор и может быть подключен к внешним источникам. Получение данных может осуществляться по кабелю USB. Они работают от батареи, портативны, оснащены микропроцессором, внутренней памятью для хранения данных и датчиками. Некоторые регистраторы данных взаимодействуют с персональными компьютерами или смартфонами для настройки, управления и анализа. Преимуществами таких датчиков являются низкая стоимость, простота сбора данных (в зависимости от количества измерений батареи хватает на 30–90 дней), интервал измерений от 5 до 15 минут, диапазон измеряемых температур (датчики подходят для измерений в жаркую погоду, рабочая температура от -30 до $+60^{\circ}\text{C}$), точность $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, влагозащищена. Недостатки: TZ-TempU02 являются одноразовыми. TDL – это точная, долговечная и недорогая альтернатива более дорогим системам регистрации температуры, которая хорошо подходит для получения качественных данных пространственного распределения при исследовании окружающей среды. Подобные измерения с использованием небольших датчиков температуры уже проводились в более ранних исследованиях [Hubbart et al., 2005; Varentsov et al., 2018; Konstantinov et al., 2018; Asa, Zemba, 2023]. В данной работе для измерений температуры воздуха датчики были снабжены радиационной защитой, как описано в работе Asa и Zemba с соавторами [Asa, Zemba, 2023], поэтому влияние прямой солнечной радиации на температуру авторы постарались свести к минимуму (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам проведения измерений были получены синхронные данные за 41 сутки измерений в 18 пунктах (в двух пунктах датчики не сохранились, и не указываются в итоговой таблице). Это позволило провести канонический анализ интенсивности городского острова тепла в его пространственном и временном развитии [Bowling, Benson, 1978; Hinkel et al., 2003; Hjort et al., 2016; Järvi et al., 2009; Magee et al., 1999].

При анализе средней температуры воздуха за весь период по всем датчикам (рис. 3) отчетливо видны различия в термической структуре поля данных: участки, располагавшиеся в центральной части (на улицах Орджоникидзе, Кирова и Кулаковского) характеризовались заметно более высокой средней температурой (в пределах от $+17,6$ до



Рис. 2. Вид датчика с импровизированной радиационной защитой

Fig. 2. View of the sensor with improvised radiation shield

$+18^{\circ}\text{C}$), в то время как наиболее «холодные» фоновые точки отмечали среднюю температуру в пределах от $+14,4$ до $+15^{\circ}\text{C}$. Мгновенные отклонения температуры воздуха от среднего значения по полю в центре городской тепловой аномалии достигали $+6^{\circ}\text{C}$ и регистрировались в ночные сроки, что подтверждают более ранние исследования [Bowling, Benson, 1978; Hinkel et al., 2003; Magee et al., 1999; Varentsov et al., 2018] и каноничная теория развития городского острова тепла, максимум в котором приходится на поздний вечер и ночь в связи с неравномерностью скорости ночного понижения температуры в урбанизированных районах (городских каньонах) и в фоновых условиях [Oke, 1982, 2017; Fan et al., 2018]. Среднее значение интенсивности острова тепла (разность между «центром города» – в качестве нее принимаются средние значения по пунктам № 2, 3, 4, 18) и фоном (средние значения по пунктам № 5, 6, 9, 11, 17) составляло порядка $+1,4^{\circ}\text{C}$ за весь период наблюдений. И это минимальное среднее значение летнего городского острова тепла, поскольку в оба набора точек входят и точки, характеризующие местные условия (точки 3 и 11), и точки, которые отличаются от локального уровня температур в *urban center* и в фоновых территориях.

Сравнение отдельно средних ночных температур (рис. 4) позволяет отделить возможное влияние солнечной радиации и возможный дневной перегрев конструкции датчика. Ночными считались сроки с 9 часов вечера до 6 часов утра по местному времени, когда солнце находилось под горизонтом. Сравнение средних ночных температур показало микроклиматические различия в температуре воздуха достигающие $4\text{--}5,6^{\circ}\text{C}$ в пользу городских ландшафтов.

Координаты и места расположения датчиков в Якутске

№	Широта	Долгота	Адрес
1	62° 0'22.79» с.ш.	129°42'3.61» в.д.	ул. К.Д. Уткина, 5
2	62° 1'51.30» с.ш.	129°43'30.86» в.д.	ул. Кирова, 20
3	62° 1'25.50» с.ш.	129°42'53.51» в.д.	ул. Ярославского, 30/2
4	62° 2'3.21» с.ш.	129°44'28.14» в.д.	ул. Орджоникидзе, 4
5	62° 6'57.09» с.ш.	129°39'27.03» в.д.	ул. Маганский тракт, 6
6	62° 6'58.55» с.ш.	129°39'24.48» в.д.	ул. Маганский тракт, 6
7	62° 3'18.98» с.ш.	129°44'7.09» в.д.	ул. Строителей, 13/1
8	62° 4'52.47» с.ш.	129°44'5.69» в.д.	ул. Кузьмина, 15/3
9	62° 9'37.23» с.ш.	129°46'57.17» в.д.	проезд Аартык, 9
10	61°59'18.04» с.ш.	129°41'26.68» в.д.	пер. Гавриила Ксенофонтова, 29, к.2
11	61°57'54.76» с.ш.	129°39'32.77» в.д.	просп. Михаила Николаева, 29, к.2
12	62° 0'19.45» с.ш.	129°40'59.29» в.д.	ул. Красильникова, 9/9
13	62° 0'48.42» с.ш.	129°39'25.62» в.д.	Мерзлотная ул., 27/2
14	62° 0'47.03» с.ш.	129°39'19.47» в.д.	Мерзлотная ул., 27/1
15	62° 1'14.61» с.ш.	129°41'24.93» в.д.	ул. Лермонтова, 128
16	62° 1'3.64» с.ш.	129°42'19.31» в.д.	ул. Кулаковского, 46
17	62° 2'22.45» с.ш.	129°37'30.12» в.д.	Вилюйский тракт, 7-й километр, 5
18	62°01'20.1» с.ш.	129°43'45.5» в.д.	ул. Кулаковского, 6

Примечание. Светло-серым цветом выделены точки в «центре города», темно-серым – «фоновые» точки.

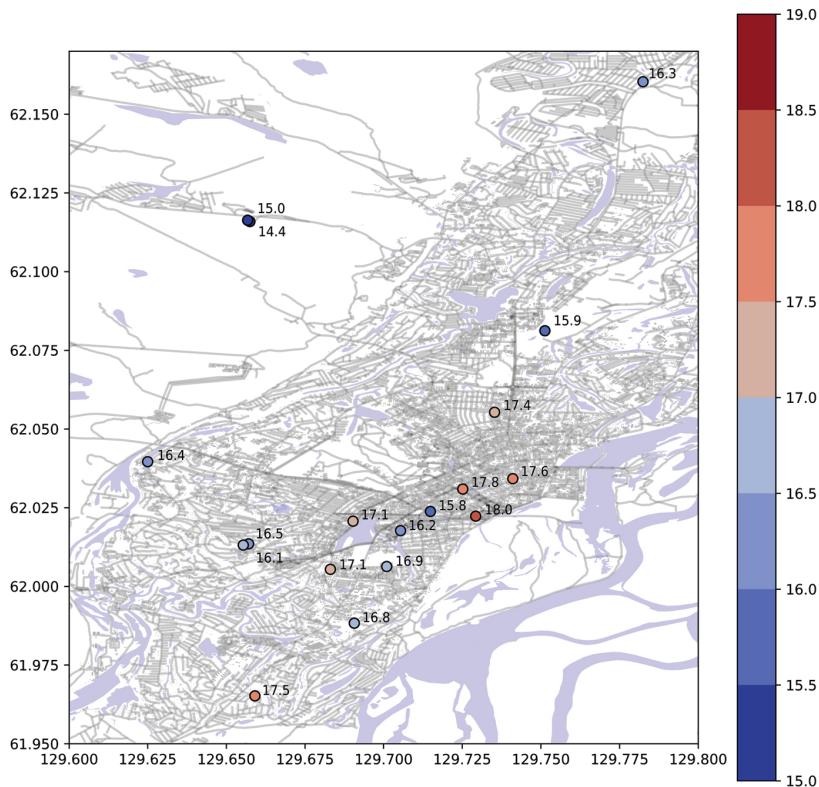


Рис. 3. Средние температуры в течение всего периода измерений (с 25 июля по 5 сентября 2024 г.) для каждой точки сети

Fig. 3. Average temperatures over the entire measurement period (July 25, 2024 to September 5, 2024) for each point in the network

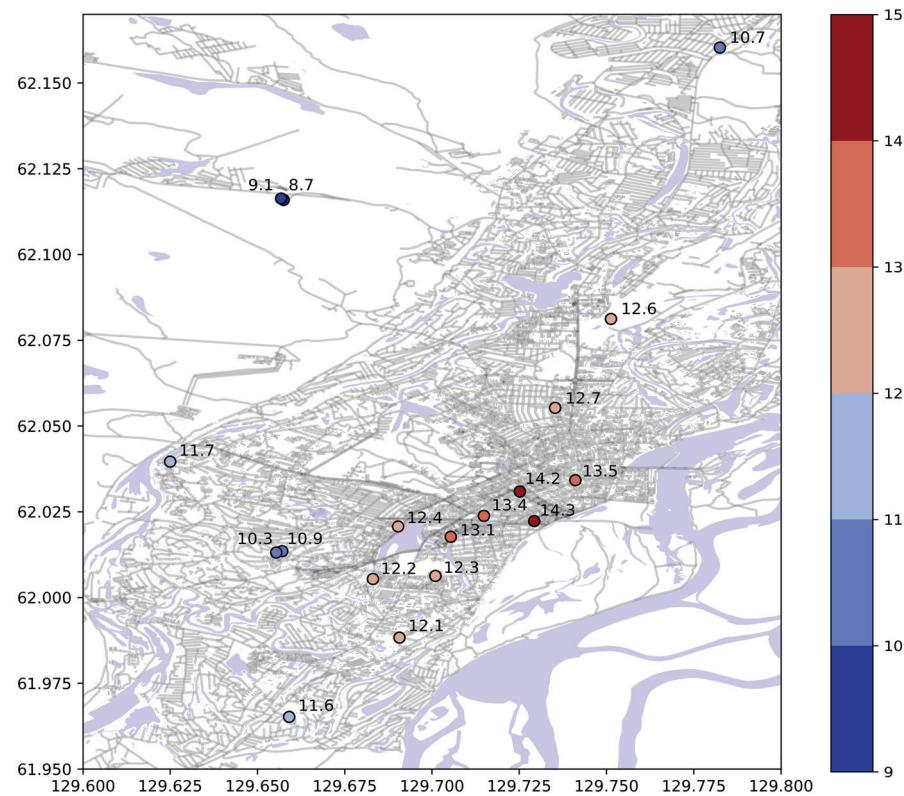


Рис. 4. Средние ночные температуры в течение периода измерений (с 25 июля по 5 сентября 2024 г.) для каждой точки сети

Fig. 4. Average night temperatures during the measurement period (July 25, 2024 to September 5, 2024) for each network point

Заключительным свидетельством в пользу именно влияния города является каноническое различие в структуре суточного хода, осредненного по точкам центра города и фона (рис. 5) – в утренние и дневные часы температура воздуха в более открытых точках фона превышает городскую не более чем на 1°C, а в ночное время более активное ночное радиационное выхолаживание в фоновых точках делает их холоднее центральных на 3–4°C.

С точки зрения оценки места Якутска в иерархии реперных точек воображаемой карты мировой городской климатологии, стоит отметить тот факт, что при населении 323 тыс. человек летнее значение острова тепла, создаваемое городом, составляющее порядка 1,4°C, как было показано выше, заставляет предположить, что среднегодовая тепловая аномалия будет заметно выше. Поскольку в предыдущих работах [Konstantinov et al., 2018] оценка острова тепла арктических городов составляет не менее 1°C исключительно за счет зимнего периода (летняя тепловая аномалия плохо диагностирована), то для рассматриваемого города зимние аномалии могут быть заметно выше (Якутск также относится к типу городов с зимним центральным отоплением). В таком случае, как и

в других изученных городах Российской Арктики (Апатиты, Надым), в Якутске интенсивность зимнего острова тепла может оказаться сравнимой и даже превышающей аналогичный показатель в городах, по количеству населения превышающих Якутск на порядки (Москва, Лондон и др.) [Варенцов и др., 2014; Baklanov et al., 2004; Esau et al., 2016, 2019; Miles et al., 2017].

В любом случае авторы рекомендуют проведение по похожему типу исследований зимних микроклиматических характеристик для уточнения масштабов интенсивности городского острова тепла в условиях экстремальных морозов (до -50°C). Для крупных городов подобного масштаба исследования проводились для Улан-Батора (Монголия), где летний остров тепла [Ganbat et al., 2013] сильно уступает зимнему (0,3°C против 3,3°C). Тем не менее разница в абсолютных высотах – около 100 м в Якутске и 1300 м в Улан-Баторе – не позволяет считать их находящимися в сходных физико-географических условиях: микроклиматические различия весьма подвержены влиянию высоты над уровнем моря, что подтверждается разницей в условиях циркуляции при сравнении городов Кольского полуострова и, например, Аляски. В данном примере именно спланированное

положение, например, Апатитов (Мурманская область) на холме определило его преимущество над Фэрбенксом (Аляска) в условиях рассеивания антропогенных примесей в городском воздухе. Исходя из данных предпосылок, представляется теоретически возможным обнаружить по итогам измерений в Якутске ранее не описанные в городской климатологии масштабы средней интенсивности зимней тепловой аномалии. Однако такое исследование потребует принципиально иных измерительных средств (мобильных датчиков температуры высокой точности, работающих при экстремально низких температурах), что и усложняет подобное исследование.

ВЫВОДЫ

В работе были проанализированы данные самостоятельно развернутой на территории города Якутска и в пригородах сети термических low-cost датчиков TZONE TZ-TempU02. Для изучаемой территории создание подобной широкой измерительной сети является беспрецедентным экспериментом в микроклиматологической истории.

Анализ полученных результатов позволяет с большой вероятностью прийти к заключению о формировании в Якутске в летний период «городского острова тепла» с предварительной оценкой его интенсивности как минимум $+1,4^{\circ}\text{C}$, в ночные часы усиливающегося до $+4^{\circ}\text{C}$.

В условиях континентального умеренного климата Якутии отмечено упоминаемое в литературе различие в суточном ходе городских и фоновых территорий, выражющееся в создании в дневные и утренние часы легкой отрицательной аномалии в затененных городских ландшафтах, по сравнению с

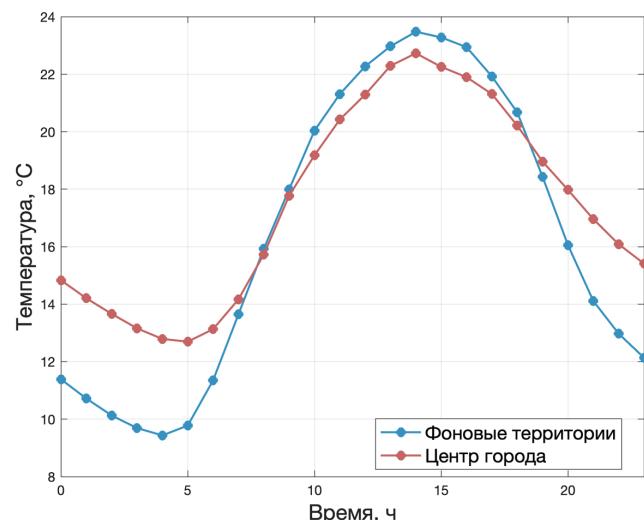


Рис. 5. Сравнение осредненных за период наблюдений суточных ходов температуры в городских ландшафтах и фоновых регионах

Fig. 5. Comparison of daily temperature averaged over the observation period in urban landscapes and background regions

более открытymi для прямой солнечной радиации пригородными районами. Данное обстоятельство подтверждает версию авторов относительно усиления канонических микроклиматических свойств городского острова тепла по мере усиления континентальности климата.

Исключительно перспективным с точки зрения фундаментальной науки видится исследование зимнего микроклимата Якутска, масштабы тепловой аномалии в котором могут превосходить описанные к текущему моменту в литературе на уровне средних сезонных значений.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00254, <https://rscf.ru/project/23-27-00254/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варенцов М.И., Константинов П.И., Самсонов Т.Е. и др. Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.
- Константинов П., Куканова А. Городские острова тепла в РФ: главные характеристики и проблемы изучения: сб. тезисов Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для моделирования окружающей среды «ENVIROMIS-2014». Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2014. С. 162–164.
- Республика Саха (Якутия) в цифрах: Краткий стат. сборник / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Саха (Якутия). Якутск, 2025. 150 с.
- Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 1. С. 22–32.
- Стручкова Г.П., Круниова Т.Г., Ракова О.В. и др. Определение тепловых аномалий г. Якутск по результатам дешифрирования спутниковых данных // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28. № 3. С. 415–424, DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424.
- Швер Ц.А., Изюменко С.А. Климат Якутска. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 246 с.
- AMAP. Arctic Monitoring and Assessment Programme climate change update 2019: An update to key findings of snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA), Oslo, Norway, 2019, p. 12.

- Asa P.S., Zemba A.A. Assessing temperature warming and cooling rates using simple statistical analysis: The case study of Jalingo metropolis, *Journal of the Bulgarian Geographical Society*, 2023, vol. 49, p. 43–51, DOI: 10.3897/jbgs.e110454.
- Baklanov A., Burzynski J., Christen A. et al. The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality, *Final Report of Working Group 2*, 2004, p. 234.
- Benz S., Bayer P., Goetttsche F. et al. Linking surface urban heat islands with groundwater temperatures, *Environmental science & technology*, 2016, vol. 50(1), p. 70–78, DOI: 10.1021/acs.est.5b03672.
- Bowling S., Benson C. Study of the subarctic heat island at Fairbanks, Alaska, *Environmental Protection Agency*, EPA-600/4-78-027, Washington, D.C., 1978, p. 150.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale, *Nature communications*, 2019, vol. 10, no. 1, p. 264, DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
- Davy R., Chen L., Hanna E. Arctic amplification metrics, *ArXiv preprint arXiv:1810.03885*, 2018, DOI: 10.48550/arXiv.1810.03885
- Esau I., Miles V. Warmer urban climates for development of green spaces in northern Siberian cities, *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, vol. 9, no. 4, p. 48–62, DOI: 10.24057/2071-9388-2016-9-4-17-23.
- Esau I., Miles V., Varentsov M. et al. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate, *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, vol. 137, p. 2513–2528, DOI: 10.1007/s00704-018-02754-z.
- Fan Y., Li Y., Yin S. Non-uniform ground-level wind patterns in a heat dome over a uniformly heated non-circular city, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 124, p. 233–246, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.069.
- Ganbat G., Han J.Y., Ryu Y.H. et al. Characteristics of the urban heat island in a high-altitude metropolitan city, Ulaanbaatar, Mongolia, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, vol. 49, no. 4, p. 535–541, DOI: 10.1007/s13143-013-0047-5.
- Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S. et al. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming, *Ecology letters*, 2009, vol. 12, no. 10, p. 1040–1049, DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E. et al. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska, *International Journal of Climatology*, 2003, vol. 23, p. 1889, DOI: 10.1002/joc.971.
- Hjort J., Suomi J., Käyhkö J. Extreme urban – rural temperatures in the coastal city of Turku, Finland: Quantification and visualization based on a generalized additive model, *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 569, p. 507–517, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.136.
- Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century, *Nature communications*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 5147, DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4.
- Hubbatt J., Link T., Campbell C. et al. Evaluation of a low-cost temperature measurement system for environmental applications, *Hydrological Processes: an International Journal*, 2005, vol. 19, no. 7, p. 1517–1523, DOI: 10.1002/hyp.5861.
- IPCC, Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2019.
- Järvi L., Hannunniemi H., Hussein T. et al. The urban measurement station SMEAR III: Continuous monitoring of air pollution and surface-atmosphere interactions in Helsinki, Finland, *Boreal environment research*, 2009, vol. 14, p. 86–109.
- Kinnard C., Zdanowicz C., Fisher D. et al. Reconstructed changes in Arctic Sea ice over the past 1,450 years, *Nature*, 2011, vol. 479, no. 7374, p. 509–512, DOI: 10.1038/nature10581.
- Konstantinov P., Baklanov A., Varentsov M. et al. Experimental urban heat island research of four biggest polar cities in Northern Hemisphere, *European Geosciences Union General Assembly*, 2014, vol. 16, p. 1.
- Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high-density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic, *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 7, p. 075007, DOI: 10.1088/1748-9326/aacb84.
- Lappalainen H., Kerminen V., Petaja T. et al. Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land-atmosphere-ocean-society continuum in the Northern Eurasian region, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2016, p. 1–107, DOI: 10.5194/acp-16-14421-2016.
- Lokoshchenko M.A., Korneva I.A. Underground urban heat island below Moscow city, *Urban Climate*, 2015, vol. 13, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.uclim.2015.04.002.
- Magee N., Curtis J., Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska, *Theoretical and applied climatology*, 1999, vol. 64, no. 1, p. 39–47, DOI: 10.1007/s00704-0050109.
- Miles V., Esau I. Seasonal and spatial characteristics of Urban Heat Islands in Northern West Siberian cities, *Remote sensing*, 2017, vol. 9, no. 10, p. 989, DOI: 10.3390/rs9100989.
- Mishra V., Ganguly A., Nijssen B. et al. Changes in observed climate extremes in global urban areas, *Environmental Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 024005, DOI: 10.1088/1748-9326/10/2/024005.
- Oke T. The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 1982, vol. 108, no. 455, p. 1–24, DOI: 10.1002/qj.49710845502.
- Oke T., Mills G., Christen A. et al. *Urban Climates*, Cambridge University Press, 2017, p. 525, DOI: 10.1017/9781139016476.
- Peng S., Piao S., Ciais P. et al. Surface urban heat island across 419 global big cities, *Environmental science and technology*, 2012, vol. 46, no. 2, p. 696–703, DOI: 10.1021/es2030438.
- Piringer M., Joffre S., Baklanov A. et al. The surface energy balance and the mixing height in urban areas-activities and recommendations of COST-Action 715, *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, vol. 124, no. 1, p. 3–24, DOI: 10.1007/s10546-007-9170-0, 2007.
- Semenova A.A., Konstantinov, P.I., Varentsov, M.I. et al. Modeling the dynamics of comfort thermal conditions in Arctic cities under regional climate change, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,

- 2019, vol. 386, no. 1, p. 012017, DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012017.
- Sitch S., McGuire A., Kimball J. et al.* Assessing the carbon balance of circumpolar Arctic tundra using remote sensing and process modeling, *Ecological applications*, 2007, vol. 17, no. 1, p. 213–234, DOI: 10.1890/1051-0761 (2007)017[0213:ATCBOC]2.0.CO;2.
- Shiklomanov N.I., Strelets D.A., Swales T.W. et al.* Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: prognostic assessment based on GCM climate projections, *Geographical review*, 2016, vol. 107, no. 1, p. 125–142, DOI: 10.1111/gere.12214.
- Steinecke K.* Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland, *Atmospheric environment*, 1999, vol. 33, iss. 24, p. 4157–4162, DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00158-2.
- Stewart I., Oke T.* Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, no. 12, p. 1879–1900, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A. et al.* Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, vol. 18, no. 23, p. 17573–17587, DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018.
- Voogt J., Oke T.* Thermal remote sensing of urban climates, *Remote sensing of environment*, 2003, vol. 86, no. 3, p. 370–384, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8.
- Wienert U., Kuttler W.* The dependence of the urban heat island intensity on latitude – A statistical approach, *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, vol. 14, no. 5, p. 677–686, DOI: 10.1127/0941-2948/2005/0069.
- Wouters H., De Ridder K., Poelmans L. et al.* Heat stress increase under climate change twice as large in cities as in rural areas: A study for a densely populated midlatitude maritime region, *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 17, p. 8997–9007, DOI: 10.1002/2017GL074889.
- Zhao L., Lee X., Smith R. et al.* Strong contributions of local background climate to urban heat islands, *Nature*, 2014, vol. 511, no. 7508, p. 216–219, DOI: 10.1038/nature13462.
- Zhou D., Xiao J., Bonafoni S. et al.* Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives, *Remote Sensing*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 48, DOI: 10.3390/rs11010048.

Электронный ресурс

Климатические нормы Якутска. URL: <https://meteoinfo.ru/climaticcities> (дата обращения 01.11.2024).

Поступила в редакцию 07.12.2024

После доработки 12.06.2025

Принята к публикации 28.08.2025

INVESTIGATION OF THE SUMMER HEAT ISLAND IN YAKUTSK BASED ON THERMAL MICROSENSOR DATA

P.I. Konstantinov¹, A.A. Semenova², U.I. Antipina³, M.A. Timofeev⁴, N.I. Tananaev⁵

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology

³ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences

^{4,5} M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

¹ Associate Professor, PhD. in Geography: kostadini@mail.ru

² Post-graduate student; e-mail: mos7kit@mail.ru

³ Junior Scientific Researcher, post-graduate student; e-mail: ant.uly@yandex.ru

⁴ Engineer-researcher; e-mail: m.a.timofeev@s-vfu.ru

⁵ Head of the Laboratory, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: tanni@s-vfu.ru

The paper describes the results of a microclimatic experiment to study the thermal structure of the city of Yakutsk applying an independent deployed network of TZONE thermal sensors. The entire city was covered with a measuring infrastructure consisting of 18 sensors for a two-month period in the second half of the summer 2024. The data obtained clearly indicate the formation of a summer temperature anomaly in Yakutsk, which can be classified as a “summer heat island”. Its intensity at night, which is a diagnostic sign of a heat island, reaches 2,5–3,6°C. The average heat island value for the entire summer period can be estimated at 1,3–1,6°C. There is also significant diversity in the daily variation of temperature inside the city and within the background zone, which is most likely due to different heating regime of the surface air. The principal cause is the differential arrival of direct solar radiation because the “background” areas are more open to the sun’s rays.

Keywords: microclimate of a city, polar regions, Arctic cities, experimental measurements, regional climatic features

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 23-27-00254, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00254/>).

REFERENCES

- AMAP. *Arctic Monitoring and Assessment Programme climate change update 2019: An update to key findings of snow, water, ice and permafrost in the Arctic* (SWIPA), Oslo, Norway, 12 p.
- Asa P.S., Zemba A.A. Assessing temperature warming and cooling rates using simple statistical analysis: The case study of Jalingo metropolis, *Journal of the Bulgarian Geographical Society*, 2023, vol. 49, p. 43-51, DOI: 10.3897/jbgs.e110454.
- Baklanov A., Burzynski J., Christen A. et al. The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality, *Final Report of Working Group 2*, 2004, 234 p.
- Benz S., Bayer P., Goetsche F. et al. Linking surface urban heat islands with groundwater temperatures, *Environmental science and technology*, 2016, vol. 50, no. 1, p. 70–78, DOI: 10.1021/acs.est.5b03672.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale, *Nature communications*, 2019, vol. 10, no. 1, p. 264, DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
- Bowling S., Benson C. *Study of the subarctic heat island at Fairbanks, Alaska*, Environmental Protection Agency, EPA-600/4-78-027, Washington, D.C., 1978, p. 150.
- Davy R., Chen L., Hanna E. Arctic amplification metrics, *ArXiv preprint arXiv:1810.03885*, 2018, DOI: 10.48550/arXiv.1810.03885.
- Esau I., Miles V. Warmer urban climates for development of green spaces in northern Siberian cities, *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, vol. 9, no. 4, p. 48–62, DOI: 10.24057/2071-9388-2016-9-4-17-23.
- Esau I., Miles V., Varentsov M. et al. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate, *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, vol. 137, p. 2513–2528, DOI: 10.1007/s00704-018-02754-z.
- Fan Y., Li Y., Yin S. Non-uniform ground-level wind patterns in a heat dome over a uniformly heated non-circular city, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 124, p. 233–246, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.069.
- Ganbat G., Han J.Y., Ryu Y.H. et al. Characteristics of the urban heat island in a high-altitude metropolitan city, Ulaanbaatar, Mongolia, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, vol. 49, no. 4, p. 535–541, DOI: 10.1007/s13143-013-0047-5.
- Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S. et al. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming, *Ecology letters*, 2009, vol. 12, no. 10, p. 1040–1049, DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E. et al. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska, *International Journal of Climatology*, 2003, vol. 23, p. 1889, DOI: 10.1002/joc.971.
- Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century, *Nature communications*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 5147, DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4.
- Hjort J., Suomi J., Käyhkö J. Extreme urban-rural temperatures in the coastal city of Turku, Finland: Quantification and visualization based on a generalized additive model, *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 569, p. 507–517, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.136.
- Hubbatt J., Link T., Campbell C. et al. Evaluation of a low-cost temperature measurement system for environmental applications, *Hydrological Processes: an International Journal*, 2005, vol. 19, no. 7, p. 1517–1523, DOI: 10.1002/hyp.5861.
- IPCC. *Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2019.
- Järvi L., Hannuniemi H., Hussein T. et al. The urban measurement station SMEAR III: Continuous monitoring of air pollution and surface-atmosphere interactions in Helsinki, Finland, *Boreal environment research*, 2009, vol. 14, p. 86–109.
- Kinnard C., Zdanowicz C., Fisher D. et al. Reconstructed changes in Arctic Sea ice over the past 1,450 years, *Nature*, 2011, vol. 479, no. 7374, p. 509–512, DOI: 10.1038/nature10581.
- Konstantinov P., Baklanov A., Varentsov M. et al. Experimental urban heat island research of four biggest polar cities in Northern Hemisphere, *European Geosciences Union General Assembly*, 2014, vol. 16, p. 1–2.
- Konstantinov P., Kukanova A. [Urban heat islands in the Russian Federation: the main characteristics and problems of studying], *Sbornik tezisov "ENVIROMIS-2014"* [Proceedings of the International Conference and Young Scientists School on Computational Information Technologies for Environmental Sciences: "ENVIROMIS-2014"], Tomsk TsNTI Publ., 2014, p. 162–164. (In Russian)
- Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high-density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic, *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 7, p. 075007, DOI: 10.1088/1748-9326/aacb84.
- Lappalainen H., Kerminen V., Petaja T. et al. Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land-atmosphere-ocean-society continuum in the Northern Eurasian region, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2016, p. 1–107, DOI: 10.5194/acp-16-14421-2016.
- Lokoshchenko M.A., Korneva I.A. Underground urban heat island below Moscow city, *Urban Climate*, 2015, vol. 13, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.uclim.2015.04.002.
- Magee N., Curtis J., Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska, *Theoretical and applied climatology*, 1999, vol. 64, no. 1, p. 39–47, DOI: 10.1007/s00704-005-0109.
- Miles V., Esau I. Seasonal and spatial characteristics of Urban Heat Islands in Northern West Siberian cities, *Remote sensing*, 2017, vol. 9, no. 10, p. 989, DOI: 10.3390/rs9100989.
- Mishra V., Ganguly A., Nijssen B. et al. Changes in observed climate extremes in global urban areas, *Environmental Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 024005, DOI: 10.1088/1748-9326/10/2/024005.
- Oke T. The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, vol. 108, no. 455, p. 1–24, DOI: 10.1002/qj.49710845502.

- Oke T., Mills G., Christen A. et al. *Urban Climates*. Cambridge University Press, 2017, p. 525, DOI: 10.1017/9781139016476.
- Peng S., Piao S., Ciais P. et al. Surface urban heat island across 419 global big cities, *Environmental science and technology*, 2012, vol. 46, no. 2, p. 696–703, DOI: 10.1021/es2030438.
- Piringer M., Joffre S., Baklanov A. et al. The surface energy balance and the mixing height in urban areas – activities and recommendations of COST-Action 715, *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, vol. 124, no. 1, p. 3–24, DOI: 10.1007/s10546-007-9170-0, 2007.
- Respublika Sakha (Yakutiya) v tsifrakh: Kratkiy stat. sbornik*, Territorial'nyi organ Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po Respublike Sakha (Yakutiya), Ya., 2025, 150 p. (In Russian)
- Semenova A.A., Konstantinov, P.I., Varentsov, M.I. et al. Modeling the dynamics of comfort thermal conditions in Arctic cities under regional climate change, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 386, no. 1, p. 012017, DOI:10.1088/1755-1315/386/1/012017.
- Shiklomanov N.I., Strelets'kiy D.A., Swales T.W. et al. Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: prognostic assessment based on GCM climate projections, *Geographical review*, 2016, vol. 107, no. 1, p. 125–142, DOI: 10.1111/gere.12214.
- Shver Ts.A., Iz'yumenko S.A. *Klimat Yakutsk* [Climate of Yakutsk], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 246 p. (In Russian)
- Sitch S., McGuire A., Kimball J. et al. Assessing the carbon balance of circumpolar Arctic tundra using remote sensing and process modeling, *Ecological applications*, 2007, vol. 17, no. 1, p. 213–234, DOI: 10.1890/1051-0761 (2007)017[0213:ATCBOC]2.0.CO;2.
- Steinecke K. Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland, *Atmospheric environment*, 1999, 24–25, p. 4157–4162, DOI:10.1016/S1352-2310(99)00158-2.
- Stewart I., Oke T. Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, no. 12, p. 1879–1900, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- Strelets'kiy D.A., Shiklomanov N.I., Grebenets V.I. Izmenenie nesushchei sposobnosti merzlykh gruntov v svyazi s potepleniem klimata na severe Zapadnoi Sibiri [Changes of the permafrost bearing capacity under climate warming in Northwest Siberia], *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. 16, no. 1, p. 22–32. (In Russian)
- Struchkova G.P., Krupnova T.G., Rakova O.V. et al. Opyredelenie teplovyykh anomalii g. Yakutsk po rezul'tatam deshifrirovaniya sputnikovykh dannykh [Identification of thermal anomalies in Yakutsk using satellite data], *Prirodnye resursy Arkтики i Subarktiki*, 2023, vol. 28, no. 3, p. 415–424, DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424. (In Russian)
- Varentsov M. I. Konstantinov P.I., Samsonov T.E. et al. Izuchenie fenomena gorodskogo ostrova tepla v usloviyakh polarnoi nochi s pomoshch'yu eksperimental'nykh izmerenii i distantsionnogo zondirovaniya na primere Noril'ska [Study of the urban heat island phenomenon in polar night conditions using experimental measurements and remote sensing using the example of Norilsk], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 4, p. 329–337. (In Russian)
- Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A. et al. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, vol. 18, no. 23, p. 17573–17587, DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018.
- Voogt J., Oke T. Thermal remote sensing of urban climates, *Remote sensing of environment*, 2003, vol. 86, no. 3, p. 370–384, DOI:10.1016/S0034-4257(03)00079-8.
- Wienert U., Kuttler W. The dependence of the urban heat island intensity on latitude – A statistical approach, *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, vol. 14, no. 5, p. 677–686, DOI: 10.1127/0941-2948/2005/0069.
- Wouters H., De Ridder K., Poelmans L. et al. Heat stress increase under climate change twice as large in cities as in rural areas: A study for a densely populated midlatitude maritime region, *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 17, p. 8997–9007, DOI: 10.1002/2017GL074889.
- Zhao L., Lee X., Smith R. et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands, *Nature*, 2014, vol. 511, no. 7508, p. 216–219, DOI:10.1038/nature13462.
- Zhou D., Xiao J., Bonafoni S. et al. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives, *Remote Sensing*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 48, DOI: 10.3390/rs11010048.

Web source

Climate norms of Yakutsk, URL: <https://meteoinfo.ru/climatcities> (access date 01.11.2024).

Received 07.12.2024

Revised 12.06.2025

Accepted 28.08.2025