

Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.9:681.5.017

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-108-118>

**Использование принципов локальных климатических зон мегаполиса
для оптимизации сети мониторинга атмосферного воздуха**

С. А. Чигридов¹, Е. Н. Кулик¹✉

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

e-mail: e.n.kulik@snga.ru

Аннотация. Высокая пространственная неоднородность мегаполисов, формирующая уникальные микроклиматические условия в разных частях города, является важным фактором, который не учитывается существующими государственными сетями мониторинга атмосферного воздуха. Данное обстоятельство снижает точность моделей рассеивания загрязняющих веществ и требует разработки научно обоснованных подходов к планированию размещения пунктов сети наблюдения. В исследовании выполнена классификация территории Ленинского района г. Новосибирска по типам локальных климатических зон (Local Climate Zone/LCZ) и дана предварительная оценка потенциальных мест для размещения пунктов мониторинговой сети с привязкой к объектам муниципальной инфраструктуры. В результате выявлены преобладающие и редко встречающиеся типы застройки и покрытий. Определено, что пространственное распределение объектов муниципальной инфраструктуры позволяет обеспечить репрезентативный охват практически всех ключевых LCZ. Сформирован предварительный список и слой векторных данных приоритетных локаций для размещения метеорологических постов. Полученные результаты подтверждают достаточность обоснования пространственного положения пунктов, позволяя перейти к оценке измерительного оборудования и разработке его конструктивного исполнения, а также к последующему детализированному моделированию полей загрязнения атмосферного воздуха.

Ключевые слова: локальные климатические зоны, классификация структуры городской территории, мегаполис, атмосферный воздух, пространственный анализ, оптимизация сети мониторинга

Для цитирования:

Чигридов С. А., Кулик Е. Н. Использование принципов локальных климатических зон мегаполиса для оптимизации сети мониторинга атмосферного воздуха. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 108–118. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-108-118>

Integrating local climate zones into air quality network design for megacities

S. A. Chigridov¹, E. N. Kulik¹✉

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: e.n.kulik@snga.ru

Abstract. The pronounced spatial heterogeneity inherent to megacities generates distinct local microclimatic conditions that remain unresolved by conventional state-run atmospheric monitoring networks. This scale mismatch introduces significant uncertainty into pollutant dispersion modeling and compromises the reliability of air quality assessments. To address this limitation, the authors propose a robust, evidence-based framework for optimizing observational network design. The study opera-

tionalizes the Local Climate Zone (LCZ) classification scheme within the Leninsky District of Novosibirsk as a testbed. The comprehensive typomorphological analysis delineated the distribution of prevailing and sporadic urban fabric types and surface covers across the territory. The findings demonstrate that the existing municipal infrastructure footprint offers sufficient logistical potential to achieve representative spatial coverage of key LCZs identified. Leveraging these insights, a preliminary shortlist of high-priority deployment sites and a corresponding vector data schema for prospective meteorological stations, geo-referenced to the street and road network, were generated. The resulting configuration validates the efficacy of the proposed methodology. The outcomes establish a definitive prerequisite for advancing to subsequent project phases, specifically the technical specification of instrumentation, engineering design of station enclosures, and high-resolution simulation of atmospheric pollution fields.

Keywords: local climatic zones, classification of the urban territory structure, megalopolis, ambient air, spatial analysis, optimization of the monitoring network

For citation:

Chigridov S. A., Kulik E. N. (2026). Integrating local climate zones into air quality network design for megacities. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 108–118. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-108-118>

Введение

Современные мегаполисы представляют собой сложные гетерогенные системы, где сочетание разнообразных типов застройки, искусственных покрытий и естественного ландшафта формирует ярко выраженную пространственную неоднородность микроклиматических условий. Такая пространственно сложная морфология территории существенно влияет на процессы переноса и рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, интерес к мониторингу которых в любом мегаполисе стоит крайне остро. Несмотря на наличие ведомственных (государственных) сетей мониторинга качества атмосферного воздуха, их пространственная разрешающая способность часто оказывается недостаточной для достоверного отражения реальной картины распределения загрязнения в городской среде. Особую актуальность данная проблема приобретает в контексте урбанизированных территорий Сибири, где природно-климатические условия усугубляют неблагоприятные особенности промышленной и жилой застройки. Новосибирск представляет собой репрезентативный объект для проведения исследований такой тематики. В частности, Ленинский район является исторически базовым для многих производственных предприятий, в его границах расположены две ТЭЦ, обеспечивающие теплом и энергией все левобережье города с плотной частной и многоэтажной городской застройкой. Оценка комфорта проживания

и качества воздуха является глобальной целью ряда исследований авторов. Предыдущие работы в указанном регионе были сфокусированы преимущественно на анализе данных распространения выбросов от стационарных источников загрязнения, тогда как влияние городского микроклимата оставалось неизученным [1, 2]. Методология локальных климатических зон (Local Climate Zone/LCZ), разработанная Т. Оке и И. Стюартом, предлагает унифицированный подход к классификации структуры городской территории по комплексу параметров, включая морфологию застройки, характеристики подстилающей поверхности и тепловые свойства материалов [3–7].

В рамках глобальной задачи разработки системы мониторинга качества атмосферного воздуха и моделирования процессов переноса и рассеивания загрязняющих веществ запланировано проектирование экспериментальной сети метеомониторинга, схему размещения пунктов которой планируется получить на основе классификации городской территории по типам локальных климатических зон с оценкой потенциала использования объектов муниципальной инфраструктуры для их размещения. Получение распределения классов LCZ на территории города и сопоставительная оценка репрезентативности этих классов согласно пространственному положению потенциальных мониторинговых пунктов составляют цель настоящего исследования.

Практическая значимость работы заключается в разработке научно обоснованного подхода к планированию систем экологического мониторинга в городской среде, который в дальнейшем может быть применен не только для г. Новосибирска, но и для других городов со схожими характеристиками застройки и планировочной структуры, а при необходимости – адаптирован под города других регионов.

Материалы и методы

Исследование выполнялось для территории Ленинского района г. Новосибирска – крупного промышленного района с населением свыше 300 тыс. человек, характеризующегося сложной структурой застройки. Район включает зоны компактной многоэтажной и среднеэтажной застройки, промышленные территории, а также озелененные пространства, что делает его репрезентативным объектом для применения методологии локальных климатических зон.

Пространственное представление территории района согласно классификации LCZ было выполнено через LCZ-Generator [8]. Сервис является официальным инструментом глобального проекта WUDAPT и реализует стандартизированный протокол картографи-

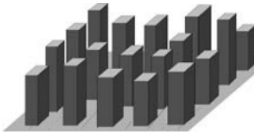
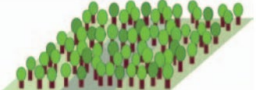
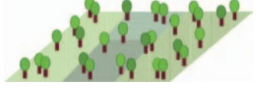
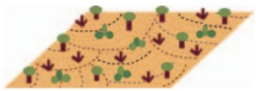
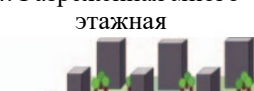
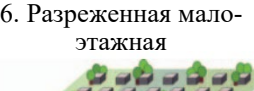
рования локальных климатических зон. Классификация LCZ в нём выполняется методом «случайного леса» (Random Forest). Выбор данного алгоритма осуществлён разработчиками сервиса и обусловлен тем, что он обеспечивает точность классификации без потери вычислительной эффективности при обработке 34 спектральных, радиолокационных и морфометрических признаков в облачной среде Google Earth Engine [8]. В отличие от нейросетей, которые требуют агрегирования пикселей и снижают пространственное разрешение итоговой карты, «случайный лес» работает как однопиксельный классификатор, что позволяет сохранить исходное высокое разрешение спутниковых снимков – критически важное условие для детального анализа неоднородной городской застройки. Все параметры алгоритма оставлены стандартными в строгом соответствии с протоколом сервиса, что обеспечивает методологическую преемственность, воспроизводимость и сопоставимость результатов с другими исследованиями, выполненными в рамках инициативы WUDAPT [9]. Входными данными для классификации служат композитный набор признаков, включающий временные ряды безоблачных изображений, спектральные индексы и поляризационные характеристики (табл. 1) [8].

Таблица 1. Используемые в LCZ-Generator данные дистанционного зондирования Земли

Сенсор	Канал/Индекс/Показатель
Landsat 8	– композиты на основе временных рядов безоблачных изображений каналов B2 (синий), B3 (зеленый), B4 (красный), B5 (ближний инфракрасный), B6/7 (коротковолновый инфракрасный 1/2), B10/11 (тепловой инфракрасный 1/2); – композиты индексных изображений BCI, NDBaI, EBBI, NDWI, NDBI, NDVI; – композиты процентилей P10 и P90 для NDVI
Sentinel 1	– данные одинарной поляризации (VV), перекрестной поляризации (VH) и двойной поляризации (VV/VH); – средние значения и стандартные отклонения (комбинации VV и VH); – индикатор VVH – это метрика, использующая двухполяризационные данные для оценки высоты зданий и городской структуры. Он использует комбинацию (VV) и (VH) обратного рассеяния для измерения объема и плотности городской застройки, обеспечивая высокую точность картирования городских территорий
Sentinel 2	– композиты на основе временных рядов безоблачных изображений каналов «красного края» (B5, B6, B7); – композиты индексных изображений NDVIre 1 и 2; – композиты индексных изображений S2REP, CSI и SEI
Прочие данные	– глобальная модель высоты лесного полога (Global Forest Canopy Height, [GFCH]); – цифровая модель рельефа (DTM), цифровая модель высот (DEM), цифровая модель поверхности (DSM)

Набор эталонов был сформирован при помощи инструментария «Google Earth» по описанию структуры классов LCZ (табл. 2) [4, 10].

Таблица 2. Сокращенные определения для локальных климатических зон

Тип застройки	Описание	Тип земного покрова	Описание
1. Компактная много- этажная 	Плотное скопление высотных зданий (более 9 этажей). Деревьев мало или совсем нет. Территория в основном заасфальтирована. Строительные материалы – бетон, сталь, камень и стекло	А. Густой лес 	Густо залесенный ландшафт с лиственными и/или вечнозелеными деревьями. Покров в основном проницаем (низкорослая растительность). Функционально это естественный лес, питомники или городской парк
2. Компактная средне- этажная 	Плотное скопление зданий средней этажности (3–9 этажей). Деревьев мало или совсем нет. Территория в основном заасфальтирована. Строительные материалы – камень, кирпич, плитка и бетон	В. Редколесье 	Слабо залесенный ландшафт с лиственными и/или вечнозелеными деревьями. Покров в основном проницаем (низкорослая растительность). Функционально это естественный лес, питомники или городской парк
3. Компактная мало- этажная 	Плотное скопление малоэтажных зданий (1–3 этажа). Деревьев мало или совсем нет. Территория в основном заасфальтирована. Строительные материалы – камень, кирпич, плитка и бетон	С. Кустарник, заросли кустарника 	Свободно произрастающие кустарники или низкорослые древесные породы. Покров в основном проницаем (обнаженная почва или песок). Функционально это естественные заросли кустарника или сельское хозяйство
4. Разреженная много- этажная 	Разреженное расположение высотных зданий (более 9 этажей). Преимущественно проницаемый почвенно-растительный покров (низкорослая растительность, редколесье). Строительные материалы – бетон, сталь, камень, стекло	Д. Низкорослая растительность 	Однородный ландшафт из травянистых растений и сельскохозяйственных культур. Мало или нет деревьев и растений. Функционально это природные луга, сельское хозяйство или городской парк
5. Разреженная среднеэтажная 	Разреженное расположение зданий средней этажности (3–9 этажей). Преимущественно проницаемый почвенно-растительный покров (низкорослая растительность, редколесье). Строительные материалы – камень, кирпич, бетон	Е. Скальные породы или асфальт 	Однородный ландшафт из скальных или асфальтированных покрытий. Мало или нет деревьев и растений. Функционально это природная пустыня (скальная) или городская транспортная инфраструктура
6. Разреженная мало- этажная 	Разреженное расположение малоэтажных зданий (1–3 этажа). Преимущественно проницаемый почвенно-растительный покров (низкорослая растительность, редколесье). Строительные материалы – камень, кирпич, плитка и бетон	Ф. Обнажённая почва или песок 	Однородный ландшафт: почвенный или песчаный покров. Мало или нет деревьев и растений. Функционально это природная пустыня или сельское хозяйство
7. Лёгкая малоэтажная 	Плотное скопление одноэтажных зданий. Деревьев мало или совсем нет. Земельный покров в основном с твёрдым покрытием. Используются лёгкие строительные материалы (например, дерево, солома, гофрированный металл)	Г. Вода 	Большие открытые водоемы, такие как моря и озера, или небольшие водоемы, такие как реки, водохранилища и лагуны
8. Крупная малоэтажная 	Разреженное расположение крупных малоэтажных зданий (1–3 этажа). Мало или нет деревьев. Территория в основном заасфальтирована. Строительные материалы – сталь, бетон, металл и камень	ИЗМЕНЧИВЫЕ СВОЙСТВА ЗЕМНОГО ПОКРОВА Переменные или временные характеристики поверхностного покрова, которые значительно меняются под влиянием погодных условий, методов ведения сельского хозяйства и/или сезонных циклов.	

Окончание таблицы 1

9. Малонаселенная 	Редкое расположение небольших или средних зданий в природном окружении. Преимущественно проницаемый почвенно-растительный покров (низкорослая растительность, редколесье). Строительные материалы – бетон, сталь, камень, стекло	b. Обнажённые кроны деревьев	Лиственные деревья без листьев (например, зимой). Увеличенный коэффициент обзора неба. Пониженное альbedo
10. Тяжёлая индустрия 	Малозэтажные и среднеэтажные промышленные сооружения (башни, резервуары, дымовые трубы). Деревьев мало или совсем нет. Земельный покров в основном асфальтированный или с твёрдым покрытием. Строительные материалы из металла, стали и бетона	c. Снежный покров	Толщина снежного покрова более 10 см. Низкая поверхностная проводимость тепла. Высокое альbedo
		d. Сухая почва	Пересохлая почва. Низкая поверхностная проводимость тепла. Большой коэффициент Боуэна. Повышенное альbedo
		w. Влажная почва	Переувлажнённая почва. Высокая поверхностная проводимость тепла. Малый коэффициент Боуэна. Пониженное альbedo

Для каждого класса LCZ было создано от 5 до 15 эталонов (рекомендации разработчиков сервиса), равномерно распределённых по территории города. Определение высоты зданий выполнялось с помощью инструмента «Street View» в «Google Earth». Верификация репрезентативности выборки проводилась путем визуального анализа спутниковых снимков высокого разрешения (рис. 1). При создании обучающего набора было выявлено, что на территории Ленинского района г. Новосибирска отсутствуют LCZ 7 и LCZ E. Точность классификации составила 71,4 % (рис. 2, 3).



Рис. 1. Примеры выделения эталонных объектов: слева – Разреженная малозэтажная (LCZ 6), справа – Редколесье (LCZ B)

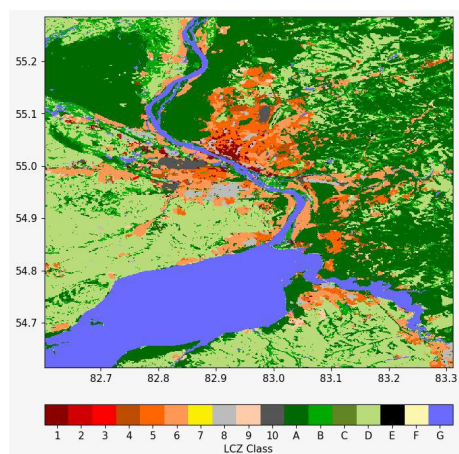


Рис. 2. Результат классификации

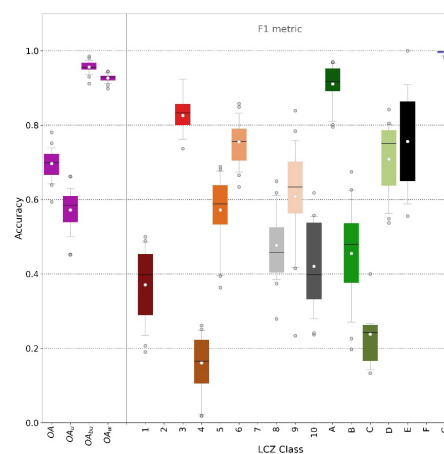


Рис. 3. Оценка точности классификации

Для оценки возможности размещения пунктов мониторинговой сети использовались данные о пространственном распределении объектов муниципальной инфраструктуры (детские сады и школы) Ленинского района города и спутниковые снимки сервиса Яндекс.Карты [11, 12]. Гипотетически пункты мониторинговой сети должны быть равномерно распределены по территории исследования. В качестве потенциальных сооружений-носителей измерительной аппаратуры предполагается выбрать муниципальные объекты, базируясь на логике их пространственного расположения, спроектированного на этапе создания градостроительных планов с учетом плотности застройки, расчетной численности населения. Также здания муниципальных объектов, предлагается выбрать по причине высокой вариабельности смежного окружения: как по наличию прилегающей застройки разной плотности и этажности, категориям загруженности соседствующих автодорог, так и по наличию «зеленого буфера» – древесной растительности (рис. 4, 5). Анализ проводился методом пространственного наложения карты LCZ и точечного слоя

муниципальных объектов с последующей экспертной оценкой репрезентативности пересечения различных типов городской среды с месторасположениями потенциальных мониторинговых постов.

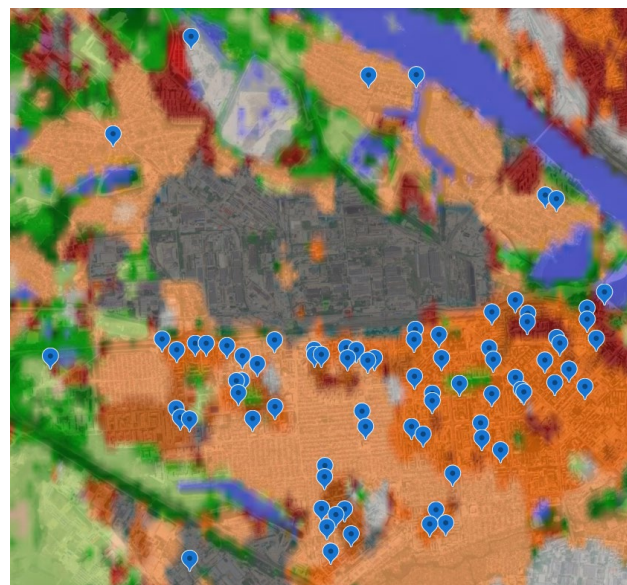


Рис. 4. Пространственное распределение зданий муниципальных объектов



Рис. 5. Примеры различной структуры застройки

Оценка потенциала размещения метеостанций показала, что в пределах определенных классификатором зон городской застройки LCZ 8–10 отсутствуют муниципальные объекты, однако смежные зоны содержат в себе объекты-кандидаты сети, находящиеся вблизи границ «слепых» зон LCZ, а значит, посредством интерполяции

можно обеспечить эти зоны расчетными значениями либо предусмотреть дополнительную установку N-станций для устранения «слепых» зон и повышения общей точности модельных расчетов пространственного распределения метеохарактеристик (рис. 6).



Рис. 6. LCZ без муниципальных объектов

Таким образом, примененный методический подход позволил не только провести классификацию городской территории по типам локальных климатических зон, но и оценить потенциал использования существующей муниципальной инфраструктуры для создания репрезентативной сети мониторинга атмосферного воздуха.

Результаты и обсуждение

В результате экспериментального исследования проведена классификация интересующей городской территории средствами LCZ-Generator и получена карта локальных климатических зон территории Ленинского района г. Новосибирска на основе набора 407 эталонных выборок. Карта демонстрирует выраженную пространственную неоднородность городской среды. Крупнейшими по площади жилыми типами LCZ в границах района оказались LCZ 4 (разреженная многоэтажная), LCZ 5 (разреженная среднеэтажная), LCZ 6 (разреженная малоэтажная) и LCZ 1 (компактная многоэтажная). Значительные площади заняты также зонами LCZ 8 (крупная малоэтажная) и LCZ 10 (тяжелая индустрия) (рис. 7).



Рис. 7. Отношение площади территории отдельных классов LCZ в границах Ленинского района г. Новосибирска

Важно отметить, что высокая общая точность классификации не гарантирует абсолютную достоверность получаемой карты. Это может быть связано с одним или несколькими из следующих факторов:

- оценка точности выполняется только для того пространства признаков, которое входит в набор обучающей выборки;
- классы полигонов обучающих выборок могут быть ошибочными из-за неправильной интерпретации ландшафта пользователем, например, из-за схожести между классами (такими как LCZ 3 и 7, А и В или 8, 10 и Е) или из-за использования непостоянных типов почвенно-растительного покрова;
- ошибки классификации LCZ зависят от количества классов, представленных обучающей выборкой: недостаточное разделение типов LCZ в обучающей выборке может привести к искусственно завышенному показателю общей точности классификации [8].

Проведенный анализ показал, что объекты муниципальной инфраструктуры (школы, детские сады, колледжи и вузы) распределены по территории района неравномерно, однако их пространственное расположение в целом повторяет распределение основных типов застройки. Муниципальные объекты-кандидаты располагаются только в классах LCZ 1, 3-6 (рис. 8, 9), поскольку отсутствие муниципальных объектов логично в растительных зонах и на территориях промышленных предприятий.

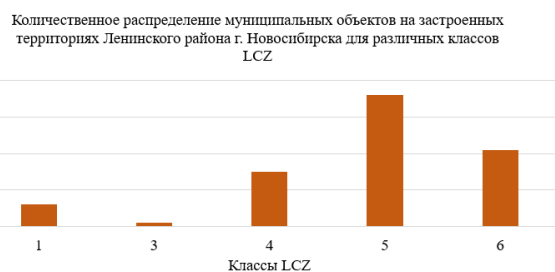


Рис. 8. Количественное распределение муниципальных объектов на застроенных территориях Ленинского района г. Новосибирска для различных классов LCZ



Рис. 9. Плотность распределения муниципальных объектов на застроенных территориях Ленинского района г. Новосибирска для различных классов LCZ

Это позволило идентифицировать для каждой выделенной локальной климатической зоны несколько потенциальных площадок для размещения мониторингового оборудования. Особую ценность представляют учреждения, расположенные в зонах перехода между различными типами LCZ, так как установка оборудования на них потенциально обеспечит возможность фиксировать динамику смены метеорологических параметров и концентраций загрязняющих веществ на границах зон разного типа.

Обсуждение полученных результатов указывает на несколько важных аспектов. Во-первых, предложенный принцип размещения станций сбора данных на базе муниципальных зданий позволяет достичь репрезентативного покрытия территории без необходимости строительства специализированных сооружений, что значительно снижает стоимость создания и эксплуатации мониторинговой сети. Во-вторых, расположение точек наблюдения в непосредственной близости от социально значимых объектов (школы, детские сады) повышает практическую ценность получаемых данных для оценки экологических рисков для здоровья особо уязвимых категорий населения – молодых поколений.

Важным результатом является также выявление «белых пятен» – зон с особыми микроклиматическими характеристиками (например, отдельные промышленные зоны или территории с уникальной морфологией застройки), для которых не удалось идентифицировать подходящие здания муниципальных объектов как будущих площадок для пунктов

сбора данных. Для этих территорий потребуется разработка индивидуальных решений по размещению оборудования.

Полученная карта LCZ и предварительный план размещения станций создают основу для перехода к следующему этапу проекта – разработке технических требований к измерительному оборудованию и его конструктивному исполнению. Особое внимание при этом должно быть уделено калибровке измерительных приборов, их защите от вандализма и удобству обслуживания.

Заключение и перспективы

Проведенное исследование положительно укрепило гипотезу эффективности методологии определения локальных климатических зон и использования данных о территориальном распределении муниципальных организаций для решения задач оптимизации пространственного размещения пунктов сети мониторинга атмосферного воздуха мегаполиса. Построенная карта LCZ Ленинского района г. Новосибирска наглядно демонстрирует высокую пространственную неоднородность городской среды, что обуславливает необходимость учета микроклиматических особенностей различных районов при планировании размещения пунктов системы измерений. Установлено, что использование зданий объектов муниципальной образовательной инфраструктуры в роли площадок для размещения измерительных станций позволит обеспечить репрезентативный охват всех ключевых типов городской среды.

Полученные результаты создают прочную основу для дальнейших исследований. В качестве непосредственной перспективы планируется публикация материалов исследования, посвященного выбору конкретного измерительного оборудования и разработке унифицированного конструктивного исполнения мониторинговых постов. Эта работа будет включать сравнительный анализ датчиков мониторинга атмосферного воздуха и метеопараметров, оценку их стоимости, точности, надежности и пригодности для длительной эксплуатации в городской среде [13–15].

С методической точки зрения, создание сети на основе разработанного плана открывает ряд новых возможностей. Прежде всего, сеть обеспечит сбор репрезентативного эмпирического массива данных о микроклиматических параметрах и концентрациях загрязняющих веществ в привязке к конкретным типам городской застройки. Эти данные станут основой для верификации и калибровки расчета моделей урбанизированного пограничного слоя атмосферы и моделей рассеивания загрязнений, что позволит перейти к созданию высокодетализированных полей загрязнения.

К долгосрочным теоретическим перспективам можно отнести проведение углубленных исследований механизмов формирования «острова тепла» в разрезе LCZ, изучение особенностей атмосферной циркуляции внутри урбанизированных каньонов разного типа, а также оценку эффективности различных градостроительных решений (озеленение, материалы с высоким альбедо) для улучшения микроклимата и качества воздуха [16, 17]. Реализация данного проекта мониторинговой сети может стать ключевым шагом в развитии комплексной системы экологического мониторинга.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чигридов С. А., Кулик Е. Н. Прогнозирование ветровых условий для оценки концентраций загрязнений от стационарных источников // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Международный научный конгресс, 21–22 мая 2025 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 4: Международная научная конференция «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск : СГУГиТ, 2025. С. 217–224. DOI 10.33764/2618-981X-2025-4-217-224.
2. Чигридов С. А., Кулик Е. Н. Геопространственное моделирование при оценке территорий для жилого строительства. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 2. С. 135–143. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-135-143.
3. Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A. Urban Climates. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 546 p. DOI 10.1017/9781139016476. URL: https://books.google.ru/books?id=7h0xDwAAQBAJ&redir_esc=y (дата обращения 15.09.2025).
4. Stewart I. D., Oke T. R. 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. URL: https://www.researchgate.net/publication/258607564_Local_Climate_Zones_for_Urban_Temperature_Studies (дата обращения 15.09.2025).
5. Alexander P. J., Mills G. Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island. Atmosphere. 2014. Vol. 5, No. 4. P. 755–774. DOI 10.3390/atmos5040755. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/5/4/755> (дата обращения: 20.09.2025).
6. Stewart I. D. A Systematic Review and Scientific Critique of Methodology in Modern Urban Heat Island Literature. International Journal of Climatology. – 2011. – Vol. 31, No. 2. – P. 200–217. DOI 10.1002/joc.2141. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2141> (дата обращения: 25.09.2025).
7. Oke T. R. Towards Better Communication in Urban Climate. Theoretical and Applied Climatology. 2006. Vol. 84, No. 1–3. P. 179–190. DOI 10.1007/s00704-005-0143-2. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-005-0143-2> (дата обращения: 29.09.2025).
8. Demuzere M., Kittner J., Bechtel B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. Frontiers in Environmental Science 9:637455. [Электронный ресурс]. LCZ-Generator – URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455> (дата обращения 25.10.2025).
9. WUDAPT [Электронный ресурс]. World Urban Database and Access Portal Tools URL: <https://www.wudapt.org/> (дата обращения 25.10.2025).
10. Google Earth [Электронный ресурс]. Google Earth. URL: earth.google.com (дата обращения 25.10.2025).
11. Департамент образования Новосибирска [Электронный ресурс]. Мэрия города Новосибирска. URL: <https://do.nios.ru/> (дата обращения 05.11.2025).

12. Яндекс.Карты [Электронный ресурс]. Яндекс URL: <https://yandex.ru/maps/65/novosibirsk/?ll=82.920430%2C55.030199&z=12> (дата обращения 05.11.2025).
13. Kelly K. E., Whitaker J., Petty A., Widmer C., Dybwad A., Sleeth D., Martin R., Butterfield A. Ambient and Laboratory Evaluation of a Low-Cost Particulate Matter Sensor. *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 221. P. 491-500. DOI 10.1016/j.envpol.2016.12.039. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28012666/> (дата обращения: 10.11.2025).
14. Nieckarz Z., Zoladz J. A. New Calibration System for Low-Cost Suspended Particulate Matter Sensors with Controlled Air Speed, Temperature and Humidity. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 17. Art. No. 5905. DOI 10.3390/s21175905. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8434339/> (дата обращения: 15.11.2025).
15. Wallace L., Bi J., Ott W., Sarnat J., Liu Y. Calibration of Low-Cost PurpleAir Outdoor Monitors Using an Improved Method of Calculating PM_{2.5}. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 256. Art. No. 118432. DOI 10.1016/j.atmosenv.2021.118432. URL: https://www.researchgate.net/publication/351315514_Calibration_of_low-cost_PurpleAir_outdoor_monitors_using_an_improved_method_of_calculating_PM25S135 (дата обращения: 18.11.2025).
16. Oke T. R. 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. URL: https://www.researchgate.net/publication/229724544_The_energetic_basis_of_urban_heat_island (дата обращения: 25.11.2025).
17. Grimmond C. S. B., Oke T. R. Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form // *Journal of Applied Meteorology*. 1999. Vol. 38, No. 9. P. 1262–1292. DOI 10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2. URL: https://www.researchgate.net/publication/224001496_Aerodynamic_Properties_of_Urban_Areas_Derived_from_Analysis_of_Surface_Form (дата обращения: 27.11.2025).

REFERENCES

1. Chigrinov S. A., Kulik E. N. (2025). Forecasting of wind conditions to assess pollution concentrations from stationary sources. *Interesko Geo-Sibir" [Interexpo Geo-Siberia]*, 4(8), 214–224. DOI 10.33764/2618-981X-2025-4-217-224. [in Russian].
2. Chigrinov S. A., Kulik E. N. (2025). Geospatial modeling in the assessment of territories for residential construction *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30(2), 135–143. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-67-76 [in Russian].
3. Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, P. 546. DOI 10.1017/9781139016476. Retrieved from: https://books.google.ru/books?id=7h0xDwAAQBAJ&redir_esc=y (accessed September 15, 2025).
4. Stewart I. D., Oke T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, No. 12, P. 1879-1900. DOI 10.1175/BAMS-D-11-00019.1. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/258607564_Local_Climate_Zones_for_Urban_Temperature_Studies (accessed September 15, 2025).
5. Alexander P. J., Mills G. (2014). Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island. *Atmosphere*, 5 (4), P. 755–774. DOI 10.3390/atmos5040755. Retrieved from: <https://www.mdpi.com/2073-4433/5/4/755> (accessed September 20, 2025).
6. Stewart I. D. (2011). A Systematic Review and Scientific Critique of Methodology in Modern Urban Heat Island Literature. *International Journal of Climatology*, 31 (2), P. 200–217. DOI 10.1002/joc.2141. Retrieved from: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2141> (accessed September 25, 2025).
7. Oke T. R. (2006). Towards Better Communication in Urban Climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84 (1–3), P. 179–190. DOI 10.1007/s00704-005-0143-2. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-005-0143-2> (accessed September 29, 2025).

8. Demuzere, M., Kittner, J., Bechtel, B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science*. DOI i: 10.3389/fenvs.2021.637455. (accessed October 25, 2025).
9. WUDAPT (n.d.). World Urban Database and Access Portal Tools. Retrieved from: <https://www.wudapt.org/> (accessed October 25, 2025).
10. Google Earth. (n.d.). Retrieved from: earth.google.com (accessed October 25, 2025).
11. Novosibirsk Department of Education. (n.d.). Retrieved from: <https://do.nios.ru/> (accessed November 05, 2025).
12. Yandex.Maps. (n.d.). Retrieved from: <https://yandex.ru/maps/65/novosibirsk/?ll=82.920430%2C55.030199&z=12> (accessed November 05, 2025).
13. Kelly K. E., Whitaker J., Petty A., Widmer C., Dybwad A., Sleeth D., Martin R., Butterfield A. (2017). Ambient and Laboratory Evaluation of a Low-Cost Particulate Matter Sensor. *Environmental Pollution*, 221, P. 491–500. DOI 10.1016/j.envpol.2016.12.039. Retrieved from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28012666/> (accessed November 10, 2025).
14. Nieckarz Z., Zoladz J. A. (2021). New Calibration System for Low-Cost Suspended Particulate Matter Sensors with Controlled Air Speed, Temperature and Humidity. *Sensors*, 21 (17), Art. No. 5905. DOI 10.3390/s21175905. Retrieved from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8434339/> (accessed November 15, 2025).
15. Wallace L., Bi J., Ott W., Sarnat J., Liu Y. (2021). Calibration of Low-Cost PurpleAir Outdoor Monitors Using an Improved Method of Calculating PM2.5. *Atmospheric Environment*, 256, Art. No. 118432. DOI 10.1016/j.atmosenv.2021.118432. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/351315514_Calibration_of_low-cost_PurpleAir_outdoor_monitors_using_an_improved_method_of_calculating_PM25S135 (accessed November 18, 2025).
16. Oke T. R. (1982). The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108 (455), P. 1–24. DOI 10.1002/qj.49710845502. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/229724544_The_energetic_basis_of_urban_heat_island (accessed November 25, 2025).
17. Grimmond C. S. B., Oke T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, 38 (9), P. 1262–1292. DOI 10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/224001496_Aerodynamic_Properties_of_Urban_Areas_Derived_from_Analysis_of_Surface_Form (accessed November 27, 2025).

Об авторах

Екатерина Николаевна Кулик – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Сергей Александрович Чигридов – аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Author details

Ekaterina N. Kulik – PhD, Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

Sergey A. Chigridov – PhD Student, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

Получено / Received 18.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.01.2026

Принята к публикации / Accepted 21.07.2026