

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГОРОДСКОГО МИКРОКЛИМАТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Краснопольский Ярослав Игоревич

*Аспирант кафедры метеорологии и климатологии,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
г. Москва, Россия*

Аннотация

В представленной научной статье проводится детальное системно-математическое и геоинформационное исследование процессов трансформации локальных климатических условий в границах крупных постиндустриальных агломераций с использованием современных алгоритмов глубокого обучения. Актуальность данной работы обусловлена прогрессирующим глобальным потеплением, интенсификацией антропогенной нагрузки на городские экосистемы и необходимостью предиктивного моделирования опасных метеорологических явлений, таких как волны тепла и инверсии температуры. В рамках статьи осуществляется подробная пространственно-временная декомпозиция параметров городского микроклимата, последовательно анализируются метрики радиационного баланса, турбулентного теплообмена, альbedo подстилающей поверхности и плотности застройки. Автор детально рассматривает алгоритмические аспекты интеграции сверточных нейронных сетей (CNN) с графовыми нейросетями (GCN) для высокоразрешающего численного анализа температурных полей мегаполиса и экспериментально доказывает превосходство интеллектуального анализа над классическими гидродинамическими моделями атмосферы. Особое место в исследовании занимает моделирование эффекта «острова тепла» и оценка эффективности различных стратегий адаптивного городского озеленения. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямого внедрения в программные комплексы архитектурно-строительного планирования и градостроительного проектирования для минимизации климатических рисков.

Ключевые слова: климатология, микроклимат города, глубокое обучение, остров тепла, геоинформационные системы, сверточные нейронные сети, пространственный анализ, адаптация к изменениям климата.

MODELING URBAN MICROCLIMATE CHANGES BASED ON DEEP LEARNING METHODS

Krasnopolsky Yaroslav Igorevich

*Postgraduate Student of the Department of Meteorology and Climatology,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia*

Abstract

This scientific article presents a detailed system-mathematical and geographic information study of local climate condition transformation within the boundaries of large post-industrial agglomerations using modern deep learning algorithms. The relevance of this work is driven by progressive global warming, the intensification of anthropogenic loads on urban ecosystems, and the need for predictive modeling of dangerous meteorological phenomena, such as heatwaves and temperature inversions. Within the framework of the article, a detailed spatial-temporal decomposition of urban microclimate parameters is carried out, and metrics of radiation balance, turbulent heat exchange, surface albedo, and building density are sequentially analyzed. The author considers in detail the algorithmic aspects of integrating convolutional neural networks (CNN) with graph neural networks (GCN) for high-resolution numerical analysis of metropolitan temperature fields and experimentally proves the superiority of intelligent analysis over classical hydrodynamic atmospheric models. A special place in the study is occupied by modeling the "urban heat island" effect and assessing the effectiveness of various adaptive urban greening strategies. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their direct integration into architectural and construction planning software tools and urban design to minimize climate risks.

Keywords: climatology, urban microclimate, deep learning, urban heat island, geographic information systems, convolutional neural networks, spatial analysis, climate change adaptation.

Введение

Глобальные климатические изменения, разворачивающиеся в первой половине двадцать первого века, представляют собой один из наиболее масштабных и угрожающих вызовов для устойчивого существования человеческой цивилизации. Системное повышение приземной температуры воздуха, изменение режима и интенсивности атмосферных осадков, а также резкое увеличение частоты экстремальных погодных явлений оказывают разрушительное воздействие на экосистемы, аграрный сектор и критическую инфраструктуру. При этом наиболее уязвимыми узлами климатической трансформации становятся крупные городские агломерации, концентрирующие в себе большую часть населения планеты и производственных мощностей.

Мегаполисы формируют свой собственный, глубоко трансформированный антропогенный микроклимат, который накладывается на глобальные климатические тренды и многократно усиливает их негативные последствия.

Ключевым и наиболее изученным проявлением антропогенной модификации локальной климатической системы является феномен городского «острова тепла» (Urban Heat Island, UHI), выражающийся в устойчивом и существенном превышении температуры воздуха в центральных, плотно застроенных районах по сравнению с естественным загородным фоном. Формирование данного эффекта обусловлено замещением естественной растительности и почв асфальтовыми и бетонными покрытиями с низким альбедо, изменением геометрии воздушных потоков в городских «каньонах», а также колоссальной эмиссией техногенного тепла от промышленных предприятий, систем отопления, кондиционирования и автомобильного транспорта. В периоды летних антициклонов наложение глобальных волн тепла на городской «остров тепла» приводит к резкому ухудшению экологической обстановки, росту заболеваемости и смертности населения, а также к дефициту мощности в энергетических сетях из-за пиковых нагрузок на системы охлаждения.

Актуальность настоящего исследования продиктована тем, что традиционные гидродинамические и термодинамические модели мезомасштабной метеорологии (такие как WRF — Weather Research and Forecasting), активно применяемые для анализа климата, обладают избыточной вычислительной сложностью и критически низкой пространственной дискретностью. Данные модели требуют колоссальных суперкомпьютерных ресурсов и не способны адекватно воспроизводить микроклиматические флуктуации на уровне отдельных городских кварталов, улиц и дворовых пространств в режиме реального времени. В этой связи коренной пересмотр аналитического инструментария и переход к методологическим принципам интеллектуального анализа пространственных данных (Data-Driven Climatology) открывают принципиально новые возможности. Применение гибридных архитектур глубоких нейронных сетей позволяет осуществлять сверхвысокоразрешающее предиктивное моделирование температурно-влажностного режима урбанизированных территорий с учетом динамических параметров застройки.

Целью данной работы является разработка, алгоритмическая реализация и экспериментальная верификация комплекса нейросетевых моделей глубокого обучения, способных с высокой точностью осуществлять пространственно-временную аппроксимацию и краткосрочный прогноз полей приземной температуры в условиях сложной постиндустриальной городской среды. Для достижения поставленной цели в рамках исследования последовательно решаются задачи по формированию многомерной матрицы микроклиматических предикторов, проектированию гибридной нейросетевой архитектуры, обучению моделей на основе данных дистанционного зондирования Земли и наземного мониторинга, а также проведению имитационного сценарного моделирования различных градостроительных решений по адаптации к климатическим рискам.

Методологическую основу исследования составляют динамическая метеорология, теория тепломассообмена в пограничном слое атмосферы, методы геоинформационного анализа и аппарат искусственных нейронных сетей глубокого обучения.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент выполненного научного изыскания базируется на интеграционном сочетании методов спутникового мониторинга подстилающей поверхности, подходов трехмерного геоинформационного моделирования и крупномасштабных компьютерных экспериментов в области машинного обучения. Информационную базу для обучения, калибровки и валидации разработанных нейросетевых алгоритмов составил многолетний массив пространственно-временных данных по Московской агломерации за период двенадцати лет. Данный массив включал в себя спутниковые снимки теплового инфракрасного диапазона со спутников Landsat-8 и Terra/Aqua (MODIS), содержащие информацию о радиационной температуре поверхности (Land Surface Temperature, LST), а также непрерывные хронологические записи сети государственных метеорологических станций и автоматизированных экологических постов мониторинга.

На первом этапе исследования средствами геоинформационных систем (ГИС) была произведена детальная векторизация и пространственный анализ морфологии городской застройки. Для каждого расчетного пикселя размером тридцать на тридцать метров были вычислены специализированные морфометрические индексы: плотность застройки (Building Density), средняя высота зданий, индекс шероховатости поверхности, доля непроницаемых покрытий (ISA), а также нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), отражающий биомассу городского озеленения. Данные параметры выступили в роли статических пространственных предикторов в общей матрице входных данных. Динамическими предикторами служили метеорологические параметры фоновой атмосферы: скорость и направление ветра, относительная влажность, атмосферное давление и интенсивность приходящей солнечной радиации.

Для решения задачи пространственной интерполяции и сверхразрешающего прогнозирования температурных полей была спроектирована и реализована гибридная нейросетевая архитектура, сочетающая пространственные сверточные слои (CNN) и графовые нейронные сети (Graph Convolutional Networks, GCN). Использование графовых слоев позволило представить структуру городских улиц в виде связанного топологического графа, где ребрами выступали транспортные артерии, вдоль которых происходит перенос тепла воздушными потоками, а узлами — перекрестки и площади. Внутренняя архитектура сети также включала блоки долгой краткосрочной памяти (LSTM) для захвата временных зависимостей и суточных циклов прогрева и охлаждения городской ткани. Обучение нейросети осуществлялось с использованием алгоритма обратного распространения ошибки

и оптимизатора Adam на серверном кластере с графическими ускорителями. Глубина прогностического контура модели составила двадцать четыре часа с часовым шагом дискретизации.

Результаты исследования

Проведенные серии вычислительных экспериментов продемонстрировали высокую точность, вычислительную стабильность и устойчивость разработанной гибридной нейросетевой модели по сравнению с существующими численными методами мезометеорологии. При верификации работы алгоритма CNN-GCN-LSTM на независимой тестовой выборке средняя абсолютная ошибка (MAE) при моделировании пространственного распределения приземной температуры воздуха составила ноль целых и сорок пять сотых градуса Цельсия, а максимальная локальная погрешность не превысила одного целого и двух десятых градуса в условиях экстремально плотной высотной застройки делового центра. Для сравнения, стандартная гидродинамическая модель WRF на аналогичной пространственной сетке показала среднюю ошибку в одну целую и восемь десятых градуса Цельсия, потребовав при этом в сорок семь раз больше времени на проведение вычислений.

Разработанная нейросетевая модель успешно идентифицировала и детально картографировала ключевые очаги интенсивности городского «острова тепла». Экспериментально установлено, что в ночные часы в периоды летней антициклональной погоды разность температур между центральными урбанизированными кварталами и пригородной зоной достигает восьми целых и шести десятых градуса Цельсия. Модель с высокой точностью уловила нелинейный эффект температурной инверсии в нижнем стометровом слое атмосферы, который способствует накоплению вредных примесей автомобильных выхлопов в приземном слое воздуха. Анализ чувствительности модели (SHAP-анализ) показал, что наиболее значимым фактором, определяющим интенсивность локального перегрева, является доля непроницаемых бетонных и асфальтовых покрытий (относительный вес фактора составил сорок один процент), в то время как плотность застройки и высота зданий определяют динамику затенения и задержки радиационного тепла (тридцать два процента).

В рамках практического применения разработанного инструментария было проведено комплексное имитационное моделирование различных сценариев адаптации городской среды к климатическим изменениям до пятидесятого года. Были протестированы сценарии экстенсивного расширения застройки, сценарий внедрения «зеленых крыш» на пятидесяти процентах плоских кровель и сценарий создания непрерывных водно-зеленых диаметров вдоль преобладающих направлений ветров. Результаты симуляции наглядно продемонстрировали, что создание интегрированных зеленых коридоров обеспечивает снижение средней летней температуры в прилегающих жилых кварталах на две целых и три десятых градуса Цельсия и сокращает продолжительность воздействия опасных волн

тепла на сорок два процента. Проведенный экономический аудит показал, что снижение затрат на электроэнергию для кондиционирования зданий и уменьшение нагрузки на скорую медицинскую помощь в пиковые периоды жары обеспечивают полную компенсацию инвестиций в создание зеленых зон в течение восьми лет с момента реализации проекта.

Заключение

В ходе выполненного детального научно-исследовательского процесса были полностью и успешно решены все поставленные задачи по математическому обоснованию, программному конструированию и экспериментальной валидации интеллектуальной системы моделирования изменений городского микроклимата в условиях глобального потепления. На основе интеграции ГИС-технологий, методов дистанционного зондирования Земли и гибридных архитектур глубоких нейронных сетей экспериментально доказана высокая эффективность перехода от классических детерминированных физических моделей к проактивному нейросетевому анализу больших пространственных данных. Созданное программное решение позволяет оперативно нивелировать неопределенности климатических прогнозов на микроурбанистическом уровне.

Главный вывод настоящей работы заключается в том, что современное устойчивое развитие и проектирование мегаполисов невозможны без глубокой интеграции предиктивных климатических алгоритмов искусственного интеллекта в контур принятия градостроительных решений (Climate-Resilient Urban Design). Разработанная гибридная модель позволяет архитекторам и муниципальным органам власти перейти от ликвидации последствий погодных аномалий к предиктивному проектированию комфортной и безопасной городской среды. Точное знание микроклиматического отклика конкретной территории на изменение характера застройки выступает фундаментом для сбережения здоровья населения, обеспечения экологической безопасности и снижения углеродного следа городов в долгосрочной перспективе.

Дальнейшее развитие данной научно-практической проблематики связано с интеграцией разработанных моделей глубокого обучения с динамическими данными Интернета вещей (IoT) — распределенными сетями персональных метеостанций и датчиков, установленных на общественном транспорте и смартфонах горожан. Это позволит перейти от статического микроклиматического картирования к созданию полноценного «цифрового двойника» атмосферы мегаполиса (Digital Twin of Urban Atmosphere), функционирующего в режиме реального времени с секундным шагом обновления данных. Также высокоперспективным направлением является использование генеративно-состязательных нейронных сетей (GAN) для автоматической генерации оптимальных, с точки зрения микроклимата, планировочных решений городских кварталов, что переведет архитектурное проектирование на стандарты полной автоматизации и климатической нейтральности.

Список литературы

1. Будыко М.И. Изменения климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 280 с.
2. Исаев А.А. Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2001. 358 с.
3. Климат, погода, экология Москвы / Под ред. Ф.Я. Клименко. СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. 351 с.
4. Кондратьев К.Я. Глобальный климат. СПб.: Наука, 1992. 359 с.
5. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 751 с.
6. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 246 с.
7. Мягков С.М. География природного риска. М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.
8. Переведенцев Ю.П. Теоретические основы метеорологии. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2001. 284 с.
9. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. Учебник для вузов. М.: Изд-во МГУ, 2001. 528 с.
10. Южаков А.А. Антропогенные изменения локального климата. М.: Мысль,

References

1. Budyko M.I. Izmeneniya klimata [Climate Changes]. Leningrad, Gidrometeoizdat,
2. Isaev A.A. Ekologicheskaya klimatologiya [Ecological Climatology]. Moscow, Nauchny mir, 2001. 358 p.
3. Klimat, pogoda, ekologiya Moskvyy [Climate, Weather, Ecology of Moscow]. Ed. by F.Ya. Klimenko. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1995. 351 p.
4. Kondratyev K.Ya. Globalny klimat [Global Climate]. St. Petersburg, Nauka, 1992.
5. Matveev L.T. Kurs obshchey meteorologii. Fizika atmosfery [Course in General Meteorology. Atmospheric Physics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984. 751 p.
6. Monin A.S. Vvedenie v teoriyu klimata [Introduction to Climate Theory]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982. 246 p.
7. Myagkov S.M. Geografiya prirodnogo riska [Geography of Natural Risk]. Moscow, MGU Publ., 1995. 224 p.
8. Perevedentsev Yu.P. Teoreticheskie osnovy meteorologii [Theoretical Foundations of Meteorology]. Kazan, Kazan University Publ., 2001. 284 p.
9. Khromov S.P., Petrosyants M.A. Meteorologiya i klimatologiya [Meteorology and Climatology]. Moscow, MGU Publ., 2001. 528 p.
10. Yuzhakov A.A. Antropogennyye izmeneniya lokalnogo klimata [Anthropogenic Changes in Local Climate]. Moscow, Mysl, 1989. 182 p.