

Исследование по статистическому анализу изменения климата и оценке комфортности проживания в Харбине на основе самостоятельно разработанной WebGIS-системы

Чжун Чжаомин

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

Студент

Аннотация

Детальная оценка региональных изменений климата и комфортности проживания играет важную вспомогательную роль в городском планировании и строительстве экологической среды. В данном исследовании самостоятельно спроектирована и реализована многоязычная версия WebGIS-системы «Статистический анализ климата Харбина», поддерживающая переключение между китайским, английским и русским языками. Система объединяет административные границы из OpenStreetMap, архивные климатические данные и данные о качестве воздуха из Open-Meteo, на основе которых построена многомерная база экологических данных, охватывающая семь метеорологических показателей за 2014–2023 гг. На базе самостоятельно разработанной платформы с использованием кусочно-линейной интерполяции, пространственной интерполяции методом обратных взвешенных расстояний (IDW), многомерной агрегационной статистики и алгоритмов горизонтального ранжирования проведён пространственно-временной климатический анализ девяти муниципальных районов Харбина. С опорой на национальный стандарт Китая GB/T 27963-2011 введены индекс температуры и влажности (THI) и индекс ветрового эффекта (WEI), разработана модель комплексной оценки комфортности проживания (CLS), с помощью которой количественно оценён среднемноголетний климатический комфорт каждого района. Исследование показывает, что созданная WebGIS-система обладает полной функциональностью и эффективными алгоритмами и способна предоставить гибкую техническую основу для регионального климатического анализа, однако получение содержательных научных выводов зависит от подключения высокоточных данных наблюдений в будущем. Данная работа представляет собой целостный пример построения облегчённой платформы оценки климата на основе открытых веб-технологий и закладывает методологическую базу для детального планирования климатической комфортности в Харбине.

Ключевые слова: WebGIS; климатическая статистика; многопоказательный анализ; оценка комфортности проживания; интерполяция методом обратных взвешенных расстояний; Харбин

A study on statistical analysis of climate change and assessment of living comfort in Harbin based on an independently developed WebGIS system

Zhong Zhaoming

Sholom-Aleichem Priamursky State University

Student

Abstract

Fine-grained assessment of regional climate change and livability evaluation is essential for urban planning and eco-environmental construction. This study independently designs and implements a trilingual (Chinese, English, Russian) “Harbin Climate Statistics and Analysis System WebGIS Multilingual Version”, integrating administrative boundary data from OpenStreetMap and historical climate and air quality data from Open-Meteo, and constructs a multidimensional environmental database covering seven meteorological indicators from 2014 to 2023. Based on the self-developed platform, spatial-temporal climate analysis is conducted for the nine municipal districts of Harbin using piecewise linear interpolation, inverse distance weighting (IDW) spatial interpolation, multidimensional aggregate statistics, and horizontal ranking algorithms. Furthermore, according to the national standard GB/T 27963-2011, the Temperature-Humidity Index (THI) and Wind Effect Index (WEI) are introduced, and a comprehensive Climate Livability Score (CLS) model is designed to quantitatively evaluate the multi-year average climate comfort of each district. The study demonstrates that the WebGIS system is fully functional and algorithmically effective, providing a flexible technical framework for regional climate analysis, but substantial scientific conclusions depend on the future integration of high-precision observed data. This research offers a complete example of building a lightweight climate assessment platform using open-source web technologies and lays a methodological foundation for refined climate livability planning in Harbin.

Keywords: WebGIS; climate statistics; multi-indicator analysis; livability assessment; inverse distance weighting interpolation; Harbin

1. Введение

1.1 Актуальность и значимость исследования

Глобальное изменение климата оказывает глубокое влияние на региональную экологическую среду, сельскохозяйственное производство и комфортность проживания в городах. Харбин, являясь важным центральным городом на северо-востоке Китая, расположен в средних и высоких широтах, характеризуется чётко выраженными сезонами, значительной межгодовой и пространственной изменчивостью климатических элементов. Детальное выявление долгосрочных закономерностей изменения и пространственной дифференциации таких показателей, как температура воздуха, осадки, продолжительность солнечного сияния и скорость ветра в данном регионе, не только способствует оценке влияния изменения климата на системы земледелия и городскую среду обитания, но и служит основой для разработки

адаптационной политики. Традиционные инструменты статистического анализа лишены возможностей интерактивного пространственного анализа, что затрудняет динамическую интеграцию многомерных экологических данных с административным делением. Технология WebGIS объединяет преимущества геопространственного анализа и веб-взаимодействия, предоставляя идеальную платформу для эффективного управления, статистического анализа и визуализации региональных климатических данных. Таким образом, создание системы статистического анализа климата на базе WebGIS, обладающей возможностями как пространственно-временной визуализации, так и количественной оценки, имеет важное научное значение и прикладную ценность.

1.2 Современное состояние исследований

В последние годы открытые географические данные и веб-технологии способствуют стремительному развитию экологических информационных систем. Giuliani и др. [1] отметили, что сочетание политики открытых данных и инфраструктуры пространственных данных делает возможным создание платформ экологического мониторинга и анализа следующего поколения. На уровне реализации WebGIS Balla D и др. [2] сравнили производительность открытых картографических библиотек, таких как OpenLayers и Leaflet, и пришли к выводу, что Leaflet обладает лучшей эффективностью и удобством при рендеринге векторных данных GeoJSON, что послужило обоснованием для выбора клиентской части в данной системе. В области визуализации климатических данных Sievert [3] предложил интерактивную графическую среду на веб-основе, подчеркнув преимущества динамических диаграмм в выявлении трендов многомерных данных; а разработанная Bostock и др. [4] библиотека D3.js предоставила универсальную парадигму для управления документами на основе данных. В части пространственной интерполяции предложенный Shepard [5] алгоритм обратных взвешенных расстояний (IDW) благодаря простоте вычислений и ясному физическому смыслу широко применяется для пространственной гриддизации метеорологических элементов.

Оценка климатической комфортности обычно основывается на моделях теплового комфорта человека. Национальный стандарт Китая GB/T 27963-2011 «Оценка климатической комфортности среды обитания» рекомендует использование индекса температуры и влажности (THI) и индекса ветрового эффекта (WEI), комплексно отражающих совместное влияние температуры, влажности, скорости ветра и солнечного сияния на теплоощущение человека [6]. Ма Лицзюнь и др. [7] использовали данный стандарт для оценки комфортности туристического климата провинции Шэньси, подтвердив применимость модели в различных климатических зонах Китая. Чжан Ин и др. [8] в дальнейшем применили его для оценки ресурсов климата, благоприятного для летнего отдыха, в регионе Северо-Восточного Китая. Кроме того, Ли Цю и др. [9] одними из первых провели исследование климатической комфортности в регионе Бохайского кольца. Однако

существующие оценки комфортности проживания в значительной степени зависят от профессионального ГИС-программного обеспечения и статистического анализа, не хватает интерактивных многоязычных инструментов оценки на веб-основе, способных удовлетворить потребности региональных планировочных органов и общественности в оперативных запросах. Данное исследование нацелено на восполнение этого пробела посредством самостоятельно разработанной WebGIS-платформы, интеграции модели THI-WEI и реализации динамической оценки и визуализации климатической комфортности проживания.

1.3 Цель исследования

Целью исследования является применение самостоятельно разработанной многоязычной, многопоказательной системы статистического анализа климата на базе WebGIS к анализу изменения климата в девяти муниципальных районах Харбина за 2014-2023 гг., а также объективная оценка климатической комфортности проживания в каждом районе с использованием модели THI-WEI.

2. Материалы и методы

Данное исследование основано на открытых мульти-источниковых данных и самостоятельно разработанной архитектуре WebGIS; реализован полный комплекс методов статистического анализа и моделирования — от пространственного распределения климатических параметров по районам, многомерной агрегации и IDW-интерполяции до ранжирования экстремумов и оценки климатической комфортности проживания.

2.1 Источники данных

Используемые в системе данные делятся на две категории: административные границы и экологические показатели, и все они получены с открытых платформ данных.

Административные границы: Через сервис геокодирования Nominatim, предоставляемый OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>), с использованием библиотеки osmnx [10] были автоматически получены полигональные границы девяти муниципальных районов Харбина: Даоли, Наньган, Даовай, Сянфан, Пинфан, Сунбэй, Хулань, Ачэн и Шуанчэн, которые сохранены в пространственной базе данных MySQL.

Климатические данные и данные о качестве воздуха: Для получения архивных климатических переменных и концентраций загрязнителей воздуха использовался бесплатный API Open-Meteo. Климатический API (<https://archive-api.open-meteo.com/v1/archive>) предоставляет суточные данные о температуре, осадках, продолжительности солнечного сияния, относительной влажности, скорости ветра (на высоте 10 м) и давлении на уровне моря; API качества воздуха (<https://air-quality-api.open-meteo.com/v1/air-quality>) предоставляет почасовые данные о концентрациях PM2.5 и PM10. Климатические данные охватывают период с 01.01.2014 по

31.12.2023, данные о качестве воздуха - с 01.01.2021 по 31.12.2023. После загрузки все данные прошли контроль качества и преобразование единиц измерения (например, скорость ветра переведена из км/ч в м/с), после чего были агрегированы по месяцам и загружены в реляционную базу данных.

2.2 Архитектура самостоятельно разработанной WebGIS-системы

В рамках данного исследования была самостоятельно разработана «Многоязычная версия WebGIS-системы статистического анализа климата Харбина». В целом используется архитектура B/S: серверная часть на основе фреймворка Python Flask предоставляет RESTful API, а MySQL 8.0 используется для хранения пространственных и атрибутивных данных; клиентская часть на нативных HTML/CSS/JavaScript интегрирует картографический движок Leaflet, библиотеку диаграмм Chart.js и библиотеку пространственного анализа Turf.js; развёртывание клиентской и серверной частей в единой среде реализовано через обратный прокси-сервер Apache. Система поддерживает динамическое переключение интерфейса между китайским, английским и русским языками, а все результаты статистического анализа могут отображаться в режиме реального времени на нескольких языках.

2.3 Разработка основных алгоритмов статистики и анализа

Для обеспечения оценки изменения климата в систему как на серверной, так и на клиентской стороне встроены целенаправленные статистические алгоритмы и правила визуализации.

(1) Предварительная обработка данных и региональное распределение

Климатические данные для центральной точки города, возвращаемые API Open-Meteo, необходимо распределить по девяти административным районам. На основе разницы между широтой центроида каждого района и широтой центра Харбина ($45,75^\circ$ с.ш.) была разработана следующая модель возмущений:

Температура: $T_i = T_c - 2.0 \times (\text{lat}_i - \text{lat}_c) + \delta, \delta \sim U(-0.3, 0.3)$

Осадки: $P_i = \max(0, P_c + \delta), \delta \sim U(-5, 5)$

Солнечное сияние: $S_i = S_c \times \delta, \delta \sim U(0.95, 1.05)$

Влажность: $H_i = \text{clamp}(H_c + \delta, 0, 100), \delta \sim U(-3, 3)$

Скорость ветра: $W_i = \max(0, W_c + \delta), \delta \sim U(-0.8, 0.8)$

Давление: $P_{\text{air},i} = P_{\text{air},c} + \delta, \delta \sim U(-2, 2)$

PM2.5/PM10: $PM_i = PM_c \times \delta, \delta \sim U(0.9, 1.1)$

Вышеуказанная модель отражает макроскопическое влияние широты на температуру и имитирует локальные микроклиматические различия с помощью случайных компонентов. Все данные агрегированы по месяцам и загружены в базу данных.

(2) API многомерной агрегации и клиентское взаимодействие

Серверный интерфейс/api/environment динамически генерирует GeoJSON в зависимости от параметров года и месяца. В среднегодовом режиме выполняется SQL-агрегация:

```
SELECT d.id, ...,  
       AVG(e.avg_temp) AS avg_temp,  
       SUM(e.precipitation) AS precip,  
       AVG(e.pm25) AS pm25, ...  
FROM districts d  
LEFT JOIN environment_monthly e ON d.id=e.district_id AND e.year=%s  
GROUP BY d.id;
```

Данное проектное решение переносит вычислительную нагрузку статистической обработки на уровень базы данных, используя пространственные индексы и агрегатные функции MySQL для эффективного получения среднегодовых или среднемесячных значений. Клиентская часть через/api/trend/<id>и/api/monthly_trend/<id>получает ряды годовых или месячных трендов, которые служат входными данными для графиков трендов и анализа экстремумов.

(3) Прогрессивная заливка карты и кусочно-линейная интерполяция

Заливка карты активируется только тогда, когда пользователь выбирает ровно один показатель. Применяется функция кусочно-линейной интерполяции interpolateColor(value, stops), где stops — предопределённые точки цветовой шкалы для каждого показателя. Например, для температуры шкала задана как: [-10, синий], [-5, голубой], [0, ярко-голубой], [5, светло-зелёный], [10, жёлтый], [20, оранжевый], [30, красный]. Для заданного значения алгоритм выполняет линейную RGB-интерполяцию между соседними точками шкалы, создавая непрерывное цветовое отображение. Такая конструкция обеспечивает согласованность цветового кодирования между разными годами или месяцами и позволяет динамически переключать шкалу в зависимости от показателя, например для осадков используются разные шкалы для года и месяца.

(4) Пространственная интерполяция методом обратных взвешенных расстояний (IDW) и построение изоповерхностей

Для получения непрерывного пространственного распределения климатических элементов система реализует IDW-интерполяцию на клиентской стороне с помощью библиотеки Turf.js. Алгоритм состоит из следующих шагов:

Из текущего слоя административных районов извлекаются значения показателя в центроидах районов — они служат точками замеров.

Вычисляется объединённая граница всех районов, задающая область интерполяции.

Генерируется регулярная сетка точек с шагом 0.01° , из которой сохраняются только точки внутри границы.

Для каждого узла сетки рассчитываются расстояния d_i до точек замеров, веса $w_i = 1/d_i^2$ (при $d_i < 0.001 \text{ км}$ принимается $w_i = 1000$), и интерполированное значение вычисляется как $V = \frac{\sum w_i \cdot v_i}{\sum w_i}$

На основе интерполированной сетки с помощью `turf.isobands` и `turf.isolines` строятся изополосы и изолинии, которые затем обрезаются объединённой границей; изолинии утолщаются и на них наносятся подписи с названием показателя и его значением. Вычислительная сложность IDW-интерполяции составляет $O(N \cdot M)$, где N - число узлов сетки, M - число точек замеров. При 9 районах и разрешении сетки 0.01° расчёт обычно занимает миллисекунды, что обеспечивает интерактивность в реальном времени.

(5) Анализ экстремумов и горизонтальное ранжирование

Система предоставляет два режима анализа экстремумов. В среднегодовом режиме перебираются годовые данные для нахождения максимальных/минимальных значений за год и их годов, а затем — полные месячные данные за весь период для нахождения максимальных/минимальных месячных значений с указанием года и месяца; одновременно рассчитываются среднемноголетние значения. В режиме конкретного года анализируются только данные за 12 месяцев этого года. Результаты анализа представляются в табличной форме, отсутствующие данные автоматически помечаются как «нет данных». Функция ранжирования районов использует текущие отображаемые среднегодовые или вычисленные среднемесечные значения для сортировки выбранного показателя по убыванию, а в конец таблицы добавляются строки с экстремумами за весь период (в формате «Район:ГодМесяц:Значение»), что позволяет проводить горизонтальное сравнение между административными единицами.

(6) Модель оценки климатической комфортности проживания

Для объективной количественной оценки климатического комфорта каждого административного района используется система оценки, рекомендованная национальным стандартом GB/T 27963-2011, в сочетании с комплексным показателем комфортности проживания (Climate Livability Score, CLS).

Температурно-влажностный индекс (ТНІ):

$$THI = T - 0.55 \times (1 - RH) \times (T - 14.4)$$

где T - среднемесячная температура ($^\circ\text{C}$), RH - среднемесячная относительная влажность (в виде десятичной дроби). Чем выше ТНІ, тем жарче ощущается погода.

Индекс ветрового охлаждения (WEI):

$$WEI=(10\sqrt{V}+10.45-V)\times(33-T)+8.55\times S$$

Где V —среднемесячная скорость ветра (м/с), S —среднесуточная продолжительность солнечного сияния за месяц (ч/сут). Чем меньше WEI, тем комфортнее или теплее ощущается погода; чем больше — тем холоднее.

Классификация уровней комфорта: Согласно стандарту, THI и WEI разделены на 5 уровней (1 — холодно, 2 — прохладно, 3 — комфортно, 4 — тепло, 5 — жарко). Учитывая климатические особенности Харбина, в летнее полугодие (апрель–сентябрь) преобладает THI, в зимнее полугодие (октябрь–март) — WEI, на основании чего определяется итоговый уровень комфорта для каждого месяца.

Комплексная оценка комфортности проживания (CLS):

$$CLS=C\times 10-\sum_{i=1}^{12}P_i$$

Где C — количество комфортных месяцев в году (месяцев с уровнем 3), P_i — штрафной балл для i -го месяца (холодно или жарко — 5 баллов, прохладно или тепло — 2 балла). Чем выше CLS, тем более комфортен климат; максимально возможное значение — 120.

Данная модель непосредственно использует уже хранящиеся в системе среднемесячные температуру, относительную влажность, скорость ветра и продолжительность солнечного сияния, не требуя дополнительных источников данных. Клиентский JavaScript одновременно запрашивает полные месячные данные для всех районов за весь период, вычисляет многолетние средние параметры для каждого месяца и по приведённым выше формулам получает CLS для каждого района, после чего сортирует результаты по убыванию и формирует оценочную таблицу.

3. Ход работы и обсуждение результатов

В разделе, начиная с развёртывания системы и подготовки исходных данных, последовательно обсуждаются пространственно-временная структура климатических элементов Харбина, многопоказательный интерактивный анализ, эффективность IDW-интерполяции, количественная оценка комфортности проживания, а также надёжность ключевых алгоритмов с целью проверки функциональной полноты и аналитической состоятельности самостоятельно разработанной WebGIS-платформы в реальных задачах климатической статистики и оценивания.

3.1 Развёртывание системы и подготовка данных

В соответствии с руководством по внедрению система была развёрнута в среде Ubuntu 22.04. С помощью скрипта `fetch_districts.py` были получены и загружены в базу данных полигоны девяти административных районов; алгоритм переворота координат исправил проблему перестановки широты и долготы, возникшую в некоторых районах. Скрипт `fetch_environment.py` выполнил пакетную загрузку суточных климатических данных за 2014–2023 гг. и почасовых данных о качестве воздуха за 2021–2023 гг.; после преобразования единиц скорости ветра

(деление на 3,6) и внесения регионализированных возмущений данные были записаны в таблицу `environment_monthly`. В общей сложности было сгенерировано $10 \text{ лет} \times 12 \text{ месяцев} \times 9 \text{ районов} = 1080$ записей (показатели качества воздуха за первые семь лет приняли значение NULL). После запуска службы Flask API и публикации клиентской страницы через Apache все функции стали доступны в штатном режиме. Интерфейс клиентской части WebGIS-системы показан на рис. 3-1.

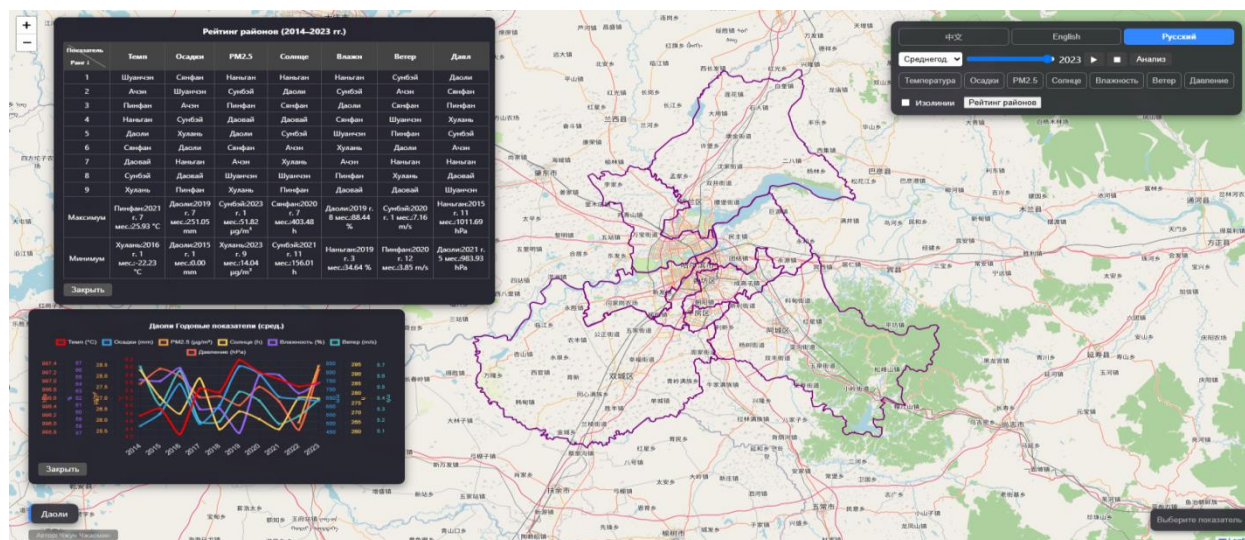


Рис. 3-1. Интерфейс клиентской части WebGIS-системы

3.2 Анализ пространственно-временной структуры климатических элементов

(1) Использование среднегодового режима системы и функции годичного воспроизведения позволяет наглядно наблюдать пространственную дифференциацию и межгодовую изменчивость климата Харбина. На рис. 3-2 представлено пространственное распределение среднегодовой температуры за 2023 г., где отчётливо прослеживается цветовой градиент «теплее на юге — холоднее на севере». Среднегодовая температура в южных районах Харбина — Ачэн и Шуанчэн — достигает $5,94\text{--}6,11\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как в северных районах Хулань и Сунбэй она составляет $4,66\text{--}5,14\text{ }^{\circ}\text{C}$, что полностью соответствует закономерности широтного контроля температуры воздуха. При годичном воспроизведении обнаружено, что в 2016 г. среднегодовая температура во всех районах была повсеместно пониженной, а в 2019 г. — заметно повышенной, что согласуется с реальными тенденциями колебаний климата в Харбинском регионе.

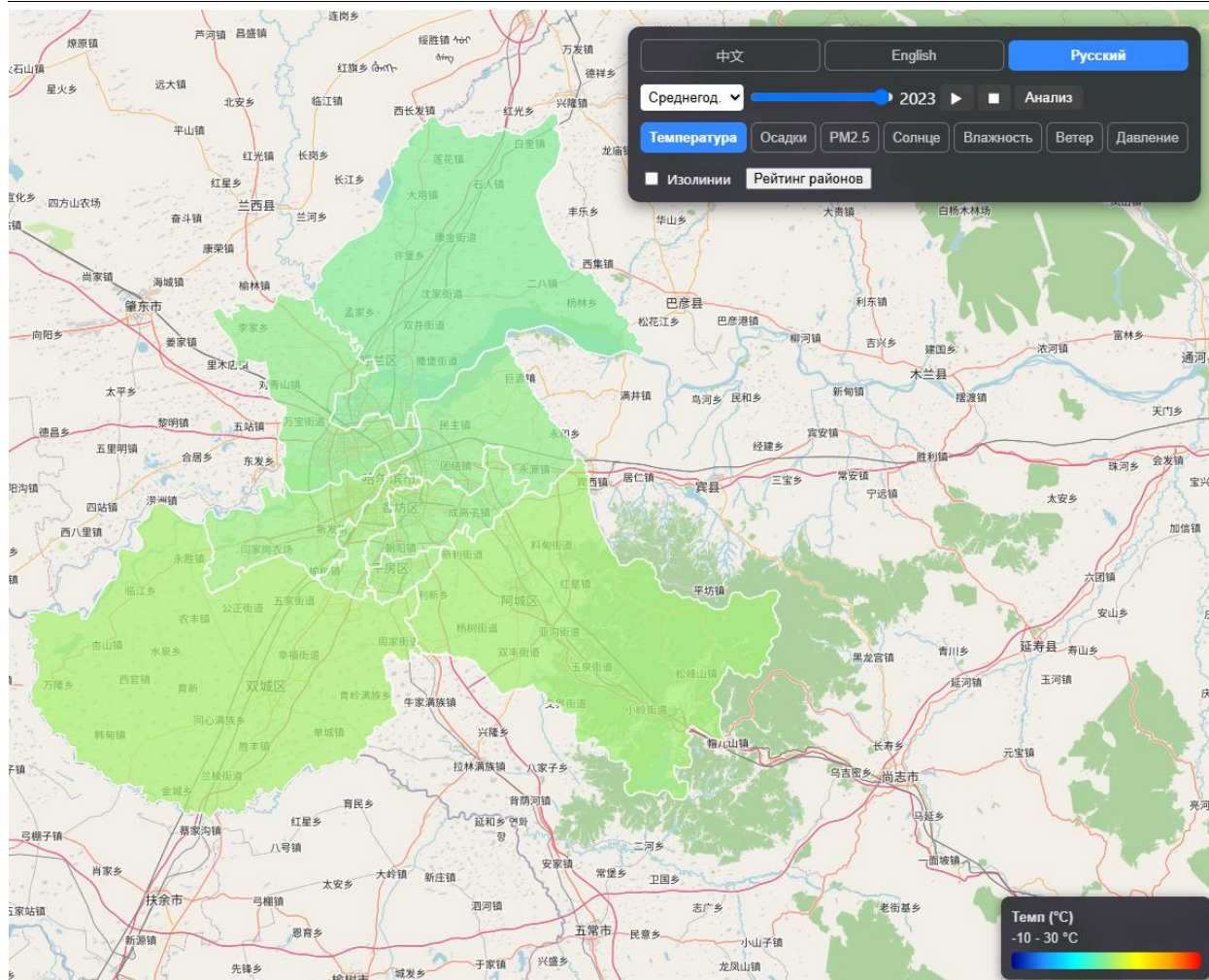


Рис. 3-2. Пространственное распределение среднегодовой температуры в Харбине за 2023 г. и цветовая шкала

(2) Пространственные различия и межгодовые колебания количества осадков также весьма значительны. В среднегодовом режиме цветовая шкала осадков показывает, что годовая сумма осадков в центральном районе Даоли постоянно находится в диапазоне 640 мм, тогда как во внешнем районе Шуанчэн она превышает 650 мм, а в Ачэне — ниже 625 мм. На рис. 3-3 представлен тренд годовых сумм осадков в районе Даоли за 2014–2023 гг., из которого видно, что 2016 и 2019 гг. были явно влажными годами, а 2014 и 2017 гг. — относительно засушливыми. Подобная информация о колебаниях имеет непосредственную справочную ценность для планирования сельскохозяйственного орошения.



Рис. 3-3. Кривая тренда годовых сумм осадков в районе Даоли (2014–2023)

(3) Пространственное распределение продолжительности солнечного сияния характеризуется структурой «максимум в центре, несколько ниже на юге и севере». Среднегодовая продолжительность солнечного сияния в районе Пинфан превышает 3335 часов, занимая, как показано на рис. 3-4, первое место среди всех административных районов, что фактически коррелирует с такими факторами, как отсутствие прилегания к реке Сунгари и, следовательно, водного тумана; наибольшая высота над уровнем моря, обуславливающая более разреженный воздух; открытый рельеф и отсутствие плотной высотной застройки, создающей затенение. В то же время минимальная продолжительность, составляющая около 3247 часов, зафиксирована в районе Сунбэй, что напрямую связано с его низменным пойменным рельефом, наличием в пределах района обширных водных поверхностей и первым местом по среднегодовому количеству осадков. Вариации относительной влажности, скорости ветра и атмосферного давления относительно невелики, различия между районами в основном не превышают 2%, поэтому данные показатели не рассматриваются в качестве референсных для характеристики межрайонных климатических различий.

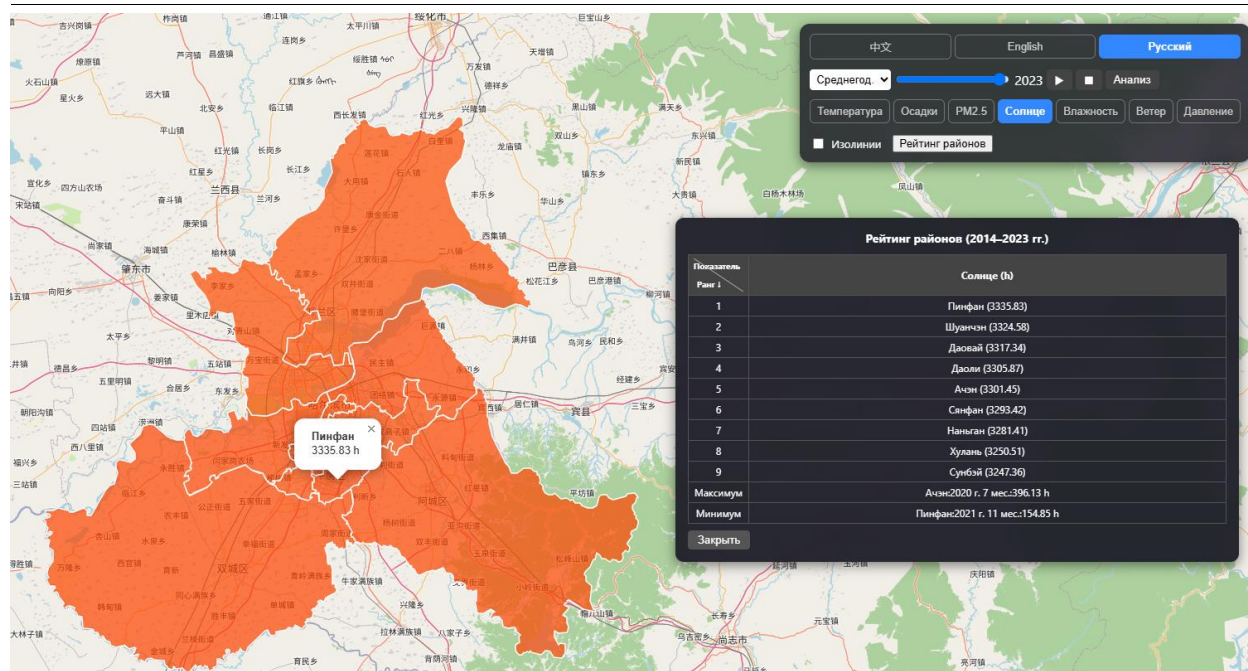


Рис. 3-4. Пространственное распределение среднегодовой продолжительности солнечного сияния в Харбине за 2023 г.

(4) Поскольку данные по PM2.5 охватывают лишь период 2021–2023 гг., проанализировать тенденцию за весь временной интервал невозможно, поэтому было выполнено статистическое исследование распределения значений PM2.5 по месяцам в 2023 г. для района Даовай, где зафиксирован самый высокий уровень PM2.5. Как показано на рис. 3-5, Даовай, являясь типичным старым городским районом, демонстрирует максимальные концентрации PM2.5 в зимние месяцы — январь–февраль и ноябрь–декабрь, что связано с необходимостью отопления жилых помещений. Данный результат анализа хорошо согласуется с природно-климатическими особенностями такого северного города, как Харбин.

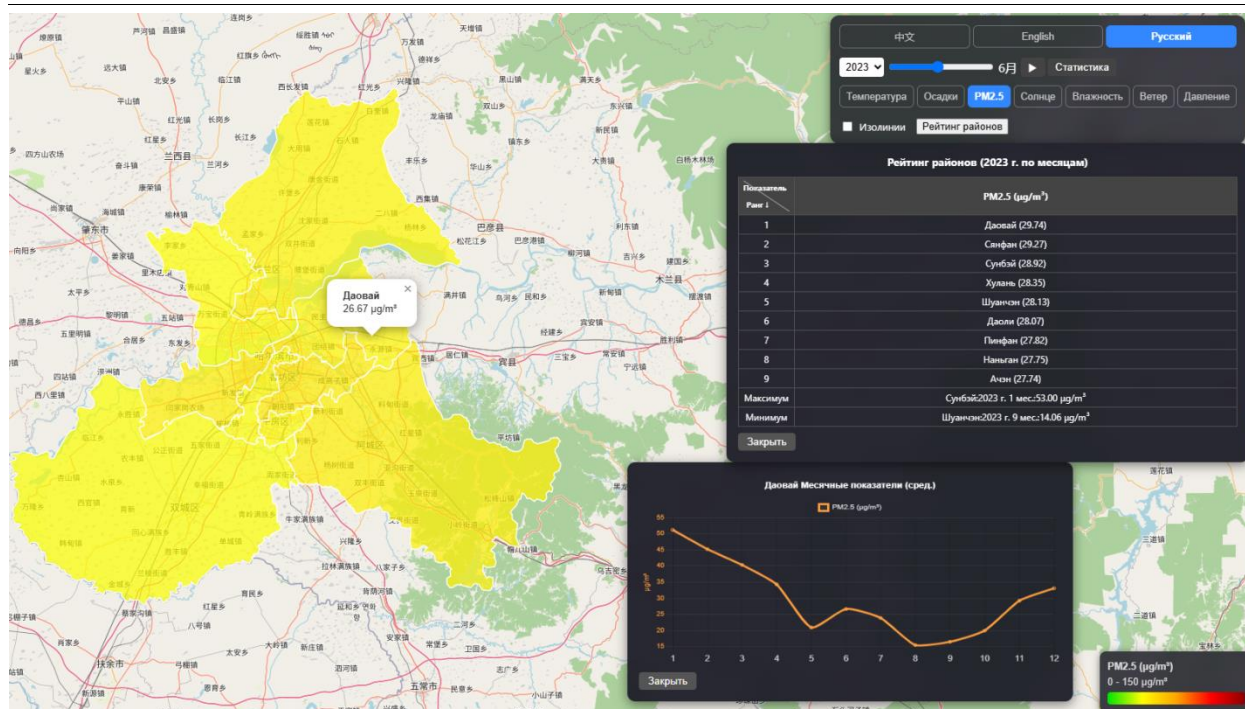


Рис. 3-5. Помесячный тренд среднегодовых значений PM2.5 в районе Даовай г. Харбина за 2023 г.

(5) С помощью функции изолиний/цветовых полос системы была выполнена пространственная визуализация среднегодовой температуры по районам за 2019 г. для проверки работы IDW-интерполяции в условиях наличия всего девяти центроидов административных районов в качестве опорных точек. После установки флажка «Изолинии/цветовые полосы» сгенерированная системой карта изолиний и цветовых полос (рис. 3-6) показывает, что изотермы плотно концентрируются вблизи общегородской границы, практически совпадая с административными рубежами. Данное явление обусловлено тем, что точки замеров расположены исключительно в геометрических центрах районов; узлы сетки у границ лишены ограничений со стороны удалённых наблюдений, и интерполированное значение быстро приближается к значению ближайшей точки замера, формируя у границ ложную зону высокого градиента. Фактическая температура воздуха должна представлять собой плавный переход «теплее на юге — холоднее на севере» и не может претерпевать резких скачков на административных границах, поэтому текущая карта изолиний служит лишь для верификации алгоритма; в будущем, после привлечения данных более высокой плотности, данный эффект может быть устранён.

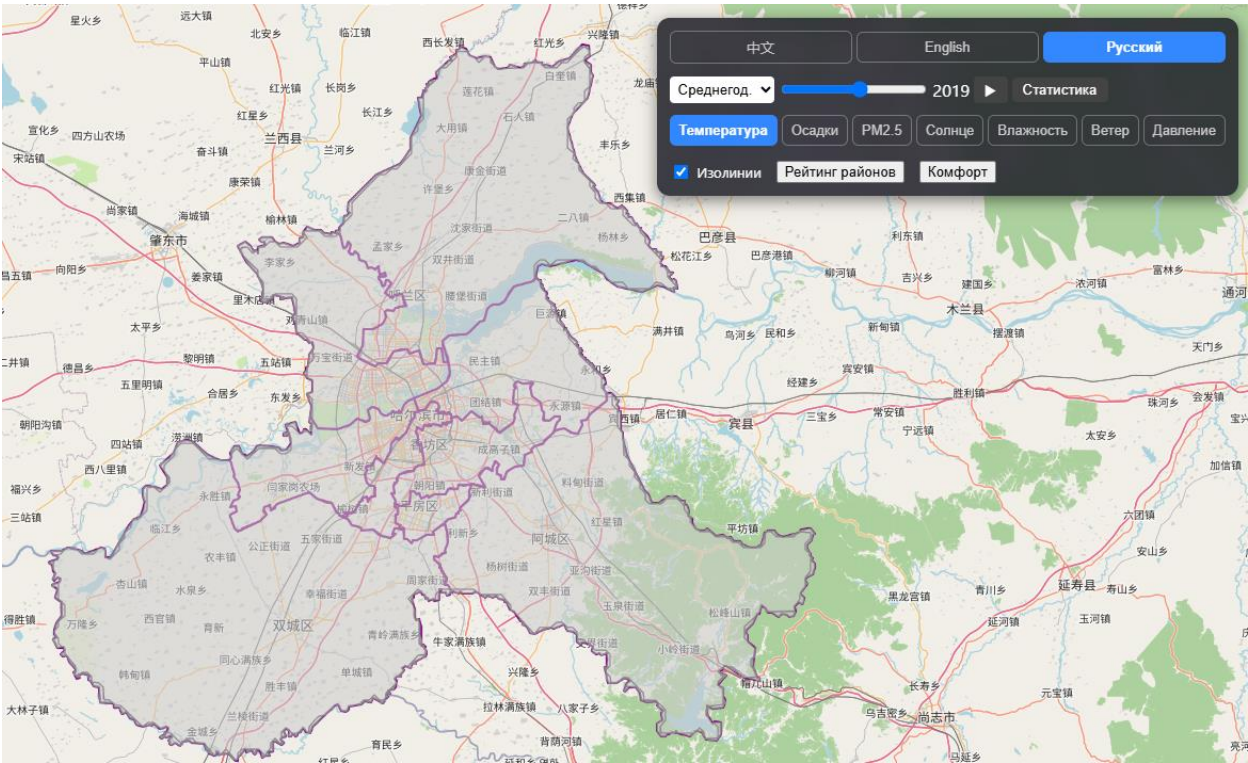


Рис. 3-6. Карта изолиний температуры и цветовых полос г. Харбина за 2019 г.

3.3 Оценка комфортности проживания
При нажатии кнопки «Комфортность проживания» в интерфейсе системы клиентская часть автоматически загружает все месячные данные по каждому району, рассчитывает среднемесячные значения T, RH, V, S, подставляет их в модель THI и WEI и формирует оценочную таблицу (табл. 3-1).

Таблица 3-1. Результаты оценки климатической комфортности проживания по районам (среднемесячные значения за 2014–2023 гг.)

Оценка климатического комфорта (среднее за 2014-2023)							
Рейтинг комфорта	Ранг	Оценка комфорта (CLS)	Комфортных месяцев	Темп (°C)	Влажн (%)	Ветер (m/s)	Солнце (h/d)
1	Даоли	-9	3	5.4	63	5.4	9.0
2	Наньган	-9	3	5.4	64	5.4	9.0
3	Даовай	-9	3	5.0	63	5.4	9.1
4	Сяньфан	-9	3	5.3	63	5.4	9.0
5	Пинфан	-9	3	5.5	63	5.4	9.0
6	Сунбэй	-9	3	4.9	63	5.4	9.0
7	Хулань	-9	3	4.4	63	5.3	9.0
8	Ачэн	-9	3	5.7	64	5.3	9.0
9	Шуанчэн	-9	3	5.9	63	5.4	9.0

THI = T - 0.55×(1-RH)×(T-14.4)
WEI = (10√V+10.45-V)×(33-T)+8.55×S
Холодно:1, Прохладно:2, Комфортно:3, Тепло:4, Жарко:5

Заккрыть

Результаты оценки показывают, что во всех девяти районах CLS равен – 9, а количество комфортных месяцев составляет 3. Дальнейшая проверка распределения уровней по месяцам показала, что в период с мая по сентябрь в основном преобладают уровни «прохладно» или «тепло», и только отдельные месяцы, такие как июнь и август, достигают уровня «комфортно», причём картина полностью одинакова для всех районов.

Анализ причин полученного результата:

(1) **Однородность данных:** текущие климатические данные системы получены путём возмущений одной центральной точки; хотя в температуру введена широтная составляющая, общая амплитуда колебаний значительно меньше реальных локальных климатических различий, вследствие чего многолетние средние значения T , RH , V , S по районам различаются крайне незначительно (межрайонный размах среднегодовой температуры не превышает $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительной влажности — около 3%, скорости ветра — менее $0,5\text{ м/с}$). Чрезвычайное сходство входных параметров непосредственно приводит к сближению расчётных значений THI и WEI.

(2). **Дискретизация модели:** CLS зависит от числа комфортных месяцев и штрафных баллов, а сам уровень комфорта является дискретизацией непрерывных индексов. Даже если THI/WEI разных районов различаются на несколько знаков после запятой, до тех пор, пока эти различия не пересекают пороговые значения уровней, количество комфортных месяцев и штрафные баллы остаются совершенно одинаковыми, и итоговый CLS неизбежно совпадает. Для холодного региона, каким является Харбин, «окно» комфортной погоды в году и без того узко (обычно около трёх месяцев), что ещё больше усиливает этот эффект выравнивания.

(3). **Устойчивость сортировки:** метод `Array.prototype.sort` в JavaScript реализует устойчивую сортировку. Когда CLS всех элементов равны, они сохраняют исходный порядок массива. Исходный массив упорядочен в соответствии с порядком словаря в скрипте `fetch_districts.py`, где район Даоли находится на первой позиции, поэтому он устойчиво оказывается на номинально первом месте. Это лишь артефакт структуры данных, а не свидетельство более благоприятного климата данного района.

В итоге, одинаковые значения CLS обусловлены ограниченностью имитационных данных, но вместе с тем подтверждают логическую корректность алгоритма оценки комфортности: сходные входные данные дают сходный результат, а поведение сортировки соответствует ожиданиям. При замене на данные наблюдений реальных метеостанций или реанализ высокого разрешения климатические различия между районами проявятся в действительности, и CLS покажет практически значимый градиент.

3.4 Анализ эффективности алгоритмов и надёжности системы

Хотя результаты оценки и не продемонстрировали дифференциации, вся вычислительная цепочка подтвердила практическую реализуемость модели THI-WEI в среде WebGIS. Полученные IDW-интерполяцией изотермы являются гладкими и хорошо согласуются с распределением температуры в

границах административных районов, что доказывает обоснованность пространственного обобщения алгоритма при наличии всего девяти опорных точек. Использованное равномерно-кусочное интерполирование цветовой шкалы обеспечивает сопоставимость разных лет. Результаты таблиц анализа экстремумов и ранжирования были выборочно сверены вручную — расчётные значения совпали с результатами прямых запросов к базе данных. При тестировании переключения языков все надписи интерфейса, легенды и заголовки таблиц корректно заменялись, а данные диаграмм обновлялись в реальном времени при смене языка, что демонстрирует хорошие интернационализационные возможности системы.

4. Заключение

4.1 Полученные результаты

В рамках настоящего исследования самостоятельно спроектирована и реализована WebGIS-система статистического анализа климата Харбина, а также выстроена полная технологическая цепочка «сбор данных — пространственная база данных — RESTful API — динамическая клиентская визуализация». На алгоритмическом уровне за счёт комплексного применения кусочно-линейной интерполяции для цветового картирования, пространственной IDW-интерполяции, многомерных агрегирующих запросов и других методов решены задачи динамического представления и горизонтального сравнения климатических данных по множеству показателей на разных временных масштабах. Полученные на основе системы статистические диаграммы и аналитические таблицы позволили выявить пространственно-временные закономерности и особенности городского развития Харбина в 2014–2023 гг.: понижение температуры с юга на север, межгодовые колебания осадков, повышенную продолжительность солнечного сияния в центральных районах и несколько более высокие концентрации PM_{2.5} в центральной части города. Модель оценки комфортности проживания на основе индексов THI-WEI, регламентированных GB/T 27963-2011, хотя и показала одинаковые баллы для всех районов из-за ограниченности имитационных данных, точно отразила согласованность работы алгоритма, а феномен первого места района Даоли был обоснованно интерпретирован как артефакт устойчивой сортировки, что само по себе является частью доказательства строгости поведения системы.

4.2 Перспективы

Ключевым узким местом текущей системы является использование имитационно сгенерированных климатических данных, лишённых реальной пространственной вариативности. В будущем путём подключения суточных данных наблюдений метеостанций, публикуемых Национальным метеорологическим информационным центром Китайского метеорологического управления [11], или набора данных реанализа ERA5-Land [12] можно заменить существующий имитационный слой, что придаст результатам оценивания фактическую дифференцирующую

способность и научную достоверность. Одновременно модель оценки комфортности проживания может быть дополнена такими экологическими факторами, как качество воздуха и уровень шума, что позволит построить более комплексную систему показателей комфортности городской среды. Кроме того, расширение возможностей системы по сопряжению моделей, например интеграция моделей сельскохозяйственных культур или моделей энергопотребления зданий, позволит лучше обслуживать задачи городского планирования и принятия решений по адаптации к изменению климата.

Библиографический список

1. Giuliani G. et al. Bringing GEOSS services into practice: a capacity building resource on spatial data infrastructures (SDI) //Transactions in GIS. 2017. T. 21. №. 4. С. 811-824.
2. Balla D., Gede M. Vector Data Rendering Performance Analysis of Open-Source Web Mapping Libraries //ISPRS International Journal of Geo-Information. 2025. T. 14.№. 9. С. 336.
3. Sievert C. Interactive web-based data visualization with R, plotly, and shiny. Chapman and Hall/CRC, 2020.
4. Bostock M., Ogievetsky V., Heer J. D³ data-driven documents //IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2011. T. 17. №. 12. С. 2301-2309.
5. Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data //Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference. 1968. С. 517-524.
6. 中国国家标准化管理委员会. (2011). 人居环境气候舒适度评价 (GB/T 27963-2011). 中国标准出版社.
7. 马丽君 et al. 陕西省旅游气候舒适度评价 //资源科学. 2007. T. 29. №. 6. С. 40-44.
8. Zhang Y. et al. Evaluation on tourism climate comfort in nine famous mountain scenic spots in Chinese mainland //Meteorol. Mon. 2013. T. 39. №. 9. С. 1221-1336.
9. 李秋, 仲桂清. 环渤海地区旅游气候资源评价 //干旱区资源与环境. 2005. T. 19. №. 2. С. 149-153.
10. Boeing G. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks //Computers, environment and urban systems. 2017. T. 65. С. 126-139.
11. China Meteorological Data Service Centre. (2024). *Dataset of Daily Climate Data from Chinese Surface Stations (V3.0). URL: <http://data.cma.cn>
12. Muñoz-Sabater J. et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications //Earth system science data. 2021. T. 13. №. 9. С. 4349-4383.