

УДК 004.01/004.046
МРНТИ 28.23.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-1-150-162>

¹**Бектемысова Г.У.,**

канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-0850-0558,

e-mail: g.bektemisova@gmail.com

^{2*}**Молдагулова А.Н.,**

канд. физ.-матем. наук, ORCID ID: 0000-0002-1596-561X,

*e-mail: a.moldagulova@satbayev.university

¹**Шайкемелев Г.Т.,**

докторант, ORCID ID: 0009-0001-6465-8894,

e-mail: g.shaikemelev@gmail.com

¹**Омаров С.С.,**

докторант, ORCID ID: 0009-0009-3371-9680,

e-mail: osskenesary@gmail.com

²**Нуралыкызы С.,**

докторант, ORCID ID: 0009-0004-2546-2751,

e-mail: s.nuralykyzy@satbayev.university

¹Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан,

²Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,
г. Алматы, Казахстан

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ АНАЛИТИКА ГОРОДСКОГО НАСЕЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВЫХ КАРТ

Аннотация

Пространственно-временная аналитика данных о движении и плотности населения играет решающую роль в построении «умного города», обеспечивая базу для оптимизации городского планирования, улучшения транспортных систем, повышения общественной безопасности населения, экологического мониторинга, развития цифровых сервисов и городской аналитики. В данной статье приведены результаты исследования по пространственно-временным закономерностям распределения и концентрации населения г. Алматы с использованием метода динамических тепловых карт. Для построения полной картины движения, плотности и активности населения использовались открытые географические данные из OpenStreetMap (OSM) и агрегированные данные мобильного оператора. Анализ нагрузки на городские квадранты размером 500×500 м на основе OSM позволил оценить ключевые закономерности изменения плотности населения в зависимости от времени суток. Визуализация пространственно-временных данных реализована с помощью библиотеки Python Folium, которая обеспечила создание наглядных интерактивных карт. Научная новизна исследования заключается в изучении урбанистических процессов г. Алматы на основе интегрированных данных из разных источников, отражающих пространственные и временные особенности динамики городского населения. Полученные результаты демонстрируют четкие паттерны концентрации населения, которые могут быть использованы для более точного прогнозирования и планирования распределения ресурсов и городской инфраструктуры.

Ключевые слова: пространственно-временная аналитика, городская среда, плотность населения, тепловая карта, городское планирование, OpenStreetMap, устойчивое развитие города.

Введение

Одним из ключевых аспектов реализации системы «умного города» является комплексное изучение пространственной и временной динамики городского населения. Распределение жителей во времени и пространстве оказывает непосредственное влияние на широкий спектр

социальных, экономических и экологических процессов: от формирования транспортных потоков и планирования жилой застройки до оценки нагрузки на городскую инфраструктуру и управления экологическими рисками. Город Алматы, являясь крупнейшим мегаполисом Казахстана и важным экономическим, образовательным и культурным центром региона, демонстрирует характерные для современных мегаполисов вызовы урбанизации. Быстрые темпы роста населения, пространственное расширение городской агломерации, высокий уровень мобильности жителей и влияние различных факторов – от сезонных миграций до транспортной инфраструктуры – делают г. Алматы идеальной площадкой для анализа пространственно-временной динамики городской среды.

Для проведения исследования используются многослойные геопространственные данные, включающие открытые картографические ресурсы OpenStreetMap (OSM), агрегированные данные мобильного оператора. Такой подход позволяет построить детализированную картину концентрации населения, выявить ключевые зоны интенсивного движения, а также определить закономерности и тенденции в распределении городской активности.

Практическая значимость данного исследования заключается в его применимости для решения актуальных задач городского планирования. Полученные результаты могут использоваться при разработке прогнозирования нагрузки на дороги, оптимальных маршрутов общественного транспорта, определении стратегически важных зон для размещения социальных объектов и коммерческой недвижимости, а также в экологическом мониторинге городской среды. Выявляя закономерности скопления населения и его пространственно-временную динамику, исследование способствует созданию более сбалансированной, адаптивной и устойчивой городской экосистемы. Таким образом, оно вносит ценный вклад не только в локальную урбанистическую политику г. Алматы, но и в глобальную дискуссию о будущих моделях развития умных городов.

Материалы и методы

Современные города сталкиваются с растущими вызовами, связанными с урбанизацией, транспортной нагрузкой, изменением климата и устойчивым развитием. Концепция умных городов направлена на решение этих проблем путем внедрения передовых технологий, таких как искусственный интеллект (ИИ), Интернет вещей (IoT) и обработка больших данных. Цель данного обзора заключается в изучении современных подходов к анализу городской динамики, включая методы обработки пространственно-временных данных, применение методов визуализации, в частности тепловых карт и моделирование миграции населения.

Для проектирования и развития концепции «умных городов» данные собираются из различных источников, включая датчики, камеры, геопространственные информационные системы (ГИС), социальные сети и мобильные приложения и т.п. Сбор, хранение, передача, обработка и анализ данных основаны на применении методов машинного обучения, нейронных сетей и анализа неструктурированных данных [1, 5].

Ключевую роль в развитии умных городов играет искусственный интеллект, обеспечивая решения для анализа больших объемов данных и прогнозной аналитики, управления транспортом, энергопотреблением, мониторинга безопасности. Методы машинного обучения и модели генеративного искусственного интеллекта применяются для оптимизации городской инфраструктуры и решения комплексных задач, связанных с городской инфраструктурой [2, 5].

В настоящее время реализовано множество успешных проектов и инициатив умных городов в разных странах Европы. Однако такие города сталкиваются с проблемами, связанными с конфиденциальностью данных, безопасностью, эффективностью городского управления и устойчивостью развития [4, 5].

Использование спутниковых данных для анализа урбанизации подтверждает важность точных данных для эффективного планирования городских территорий. Например, исследование в Туркестанском регионе показало, что фактический уровень урбанизации значительно

ниже официальных данных, что может повлиять на городское планирование в других регионах, включая г. Алматы [6].

Роль науки о данных в городском планировании неопределима. Анализ информации о плотности населения, транспортных потоках и инфраструктуре способствует повышению эффективности управления городом. Этот подход имеет прямое отношение к исследованию агрегации населения в г. Алматы, поскольку данные позволяют выявить зоны с высокой плотностью и оптимизировать распределение ресурсов [6].

Методология визуальной аналитики данных о мобильности населения, включающая тепловые карты для оценки плотности населения, широко обсуждается в научной литературе [7]. В г. Алматы этот метод может быть полезен для выявления миграционных потоков и концентрации населения в различных районах города.

Для обеспечения устойчивости в развитии умных городов необходимо учитывать адаптацию городской среды к изменяющимся условиям. Это особенно важно при изучении агрегации населения г. Алматы, где инновационные решения должны сопровождаться устойчивым развитием городской инфраструктуры [8].

Метод мониторинга эффекта городского теплового острова (UHI) может быть полезен в контексте анализа плотности населения с использованием тепловых карт, поскольку температурные изменения влияют на распределение населения в городской среде [9].

Применение кластерного анализа для изучения пространственного распределения населения в 2D- и 3D-моделях актуально для г. Алматы, поскольку позволяет более точно прогнозировать демографические тенденции с учетом различных пространственных факторов [10].

Исследования показывают, что процесс урбанизации включает фазы децентрализации и последующей рецентрализации населения, что наблюдается в разных странах [11]. Математическое моделирование пространственных циклов урбанизации, таких как сокращение численности населения в центрах городов с последующим ростом в пригородах, а затем обратный процесс, позволяет анализировать механизмы пространственного перераспределения населения.

Модели перемещения населения в мегаполисах используют метод факторизации тензоров с учетом пространственного контекста [12]. Например, пространственная неоднородность роста населения в городах США приводит к тенденции миграции и урбанистической экспансии [13].

В г. Сиань (Китай) исследования, основанные на мобильных данных, демонстрируют влияние городской среды на распределение населения [14].

Некоторые исследования рассматривают глобальные тенденции урбанизации, связывая пространственное развитие городов с их возрастом [15]. Анализ пространственно-временных изменений городов проводится с использованием данных дистанционного зондирования и ГИС [16].

Для изучения пространственной организации населения и динамики городов широко применяются меры энтропии [17]. В развивающихся странах актуально исследование взаимосвязи между ростом городов и земельной политикой [18].

Математическое моделирование влияния пространственной структуры городов на их рост и развитие получило широкое применение [19]. Всесторонний подход к моделированию урбанистической динамики, объединяющий микро- и макроанализ, позволил достичь значительного прогресса в изучении и объяснении процессов пространственного развития городов [20].

Анализ динамики населения с помощью тепловых карт является одним из перспективных направлений в изучении городских процессов. Тепловые карты позволяют визуализировать изменения плотности населения во времени, что помогает выявить ключевые зоны притока и оттока населения, а также оценить влияние инфраструктурных изменений и экономических факторов на распределение жителей. Этот метод особенно полезен для прогнозирования демографических трендов и эффективного планирования городской среды [21].

Таким образом, современные исследования показывают, что умные города требуют комплексного подхода к анализу городских процессов. Применение искусственного интеллекта, методов машинного обучения, геопространственных данных и тепловых карт позволяет выявлять пространственные закономерности миграционных потоков и плотности населения. Интеграция этих методов в городское планирование способствует повышению эффективности управления ресурсами и созданию устойчивой городской среды. В будущем развитие технологий дистанционного зондирования и аналитики больших данных продолжит оказывать значительное влияние на урбанистическую динамику, что требует дальнейших исследований и совершенствования существующих подходов.

Анализ существующих моделей реализации концепции «умного города» позволяет выделить три основных подхода: роботизированный, аналитический и гибридный (объединяющий элементы робототехники и аналитики). Реализация умных городов может осуществляться с применением различных технологий и инструментов, обеспечивающих повышение эффективности городской инфраструктуры.

Одними из ключевых направлений внедрения интеллектуальных решений в городскую среду являются:

1. «Умные» остановки, оборудованные современными USB-разъемами, солнечными батареями, интерактивными картами города и маршрутов. В данном случае «умный» компонент реализуется преимущественно за счет инженерных решений, предполагающих оснащение остановочных комплексов дополнительным оборудованием, дисплеями, аккумуляторными модулями и другими технологическими элементами.

2. «Умное» освещение – автоматическая регулировка яркости уличных фонарей в зависимости от уровня естественного освещения. Этот подход основан на роботизированных технологиях, включающих применение датчиков освещенности и драйверов управления световыми потоками, что позволяет оптимизировать энергопотребление.

3. «Умная» парковка – мониторинг и управление доступностью парковочных мест с использованием мобильного приложения. В данном случае «умная» составляющая обеспечивается цифровизацией процесса и интеграцией парковочной инфраструктуры с геоинформационными системами.

4. «Умное» планирование – стратегическое управление городской инфраструктурой, включая оптимизацию маршрутов общественного транспорта, определение мест размещения образовательных учреждений, центров обслуживания населения и торговых точек. Этот подход основан на использовании методов анализа данных и технологий машинного обучения, позволяющих выявлять закономерности пространственного распределения городской активности.

Решение задачи «умного» планирования городской инфраструктуры возможно на основе применения методов машинного обучения и пространственного анализа. Одним из перспективных подходов является использование модели, основанной на анализе миграционных потоков и плотности населения с применением тепловых карт, что позволяет визуализировать пространственно-временные паттерны городской активности и повышать эффективность принятия управленческих решений [22]. Pipeline этой модели включает следующие этапы:

1. Сбор данных. Источниками являются данные OpenStreetMap и сотовых операторов. Для интеграции пространственных данных используется ГИС.

2. Обработка данных. На этом этапе осуществляется фильтрация и очистка данных для удаления шумов и аномалий. Применяются методы кластерного анализа для выявления зон с высокой концентрацией населения.

3. Создание тепловых карт. На этом этапе осуществляется генерация динамических тепловых карт на основе временных данных. Проводится анализ изменения плотности населения в зависимости от времени суток и транспортных потоков.

В процессе настраивается сбор данных, выполняется их анализ и построение моделей машинного обучения. Результаты анализа представляются в виде информационных панелей или карт, после чего проводится обучение модели.

Особое внимание следует уделить процессу сбора данных с использованием OpenStreetMap (OSM), который является ключевым шагом в обеспечении точности и релевантности модели.

На этапе сбора данных из OSM осуществляется загрузка географической информации, относящейся к г. Алматы. Данный набор данных включает сведения о дорожной инфраструктуре, застройке, общественных пространствах и других элементах городской среды. Полученные данные будут структурированы и представлены в виде графа, что обеспечит возможность их дальнейшего анализа и наложения на цифровую карту города.

Для представления данных OSM в графовом формате необходимо выполнить следующие этапы:

1. Извлечение данных: загрузка пространственной информации из OSM, относящейся к исследуемой территории.

2. Преобразование данных в графовую структуру: вершины графа представляют собой ключевые точки городской сети (например, перекрестки или значимые объекты), а ребра – дороги, соединяющие эти точки. При построении графа необходимо учитывать информацию о направлениях движения, если таковая присутствует в данных OSM.

3. Определение весов ребер: весовые коэффициенты ребер могут представлять расстояние между узлами, время в пути, характеристики дорожного покрытия, ограничения скорости и другие параметры, имеющие значение для анализа транспортной инфраструктуры.

4. Сохранение графовой модели: представление графа в одном из стандартных форматов хранения, таких как GraphML или JSON, что обеспечивает его дальнейшую обработку и интеграцию с другими системами.

5. Применение графовой модели: использование полученного графа для наложения на цифровую карту города, расчета оптимальных маршрутов, моделирования транспортных потоков, оценки доступности объектов инфраструктуры и решения других задач пространственного анализа.

6. Визуализация графа: отображение графовой структуры на цифровой карте с использованием инструментов анализа данных и библиотек Python, в частности NetworkX.

Географические данные OpenStreetMap по г. Алматы представлены в формате GeoJSON, структура которого приведена на рисунке 1.

```
{'type': 'FeatureCollection',
  'features': [{'type': 'Feature',
    'properties': {'osm-relation-id': '2465058',
      'name': 'Almaty',
      'nameRu': 'Алматы'},
    'geometry': {'type': 'MultiPolygon',
      'coordinates': [[[[[76.7826597, 43.3199019],
        [76.7734932, 43.3186465],
        [76.7714802, 43.3181553],
        [76.7719976, 43.3171591],
        [76.7723961, 43.3167519],
        [76.7603077, 43.3140048],
        [76.7536005, 43.3179699],
        [76.7415934, 43.3154189],
        [76.7382775, 43.314451],
        [76.7387238, 43.313583],
```

Рисунок 1 – Географические данные OpenStreetMap по г. Алматы в формате GeoJSON (URL: <https://polygons.openstreetmap.fr/index.py?id=2465058>)
Данные актуальны на 07.10.2023.

В закрытом формате данные представлены в виде координат, обозначающих границы г. Алматы. В дальнейшем эти данные будут разбиты на непересекающиеся квадранты для более детального пространственного анализа.

Границы г. Алматы, определенные на основе открытых геоданных, представлены на рисунке 2.

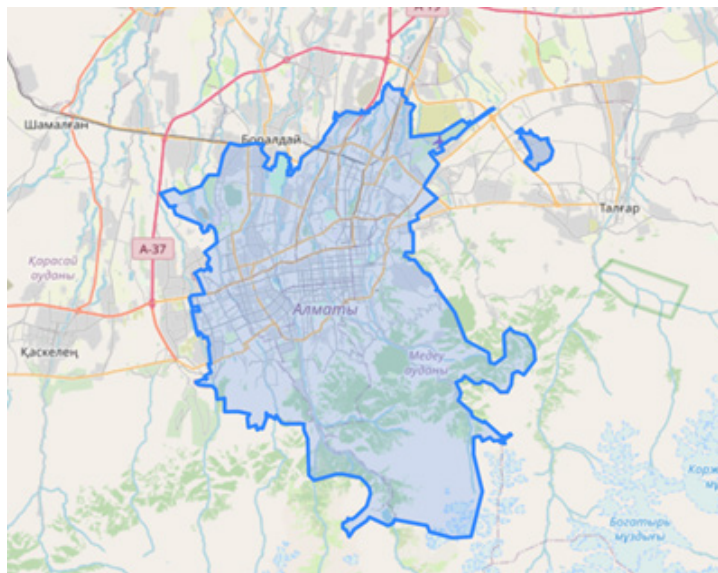


Рисунок 2 – Границы г. Алматы

На следующем этапе исследуемая территория города была разделена на равные квадранты размером 500×500 м. Данный процесс был реализован с использованием алгоритмов на Python, что позволило обеспечить точную геометрическую сегментацию территории для последующего анализа.

Результат разбиения на квадранты представлен на рисунке 3.

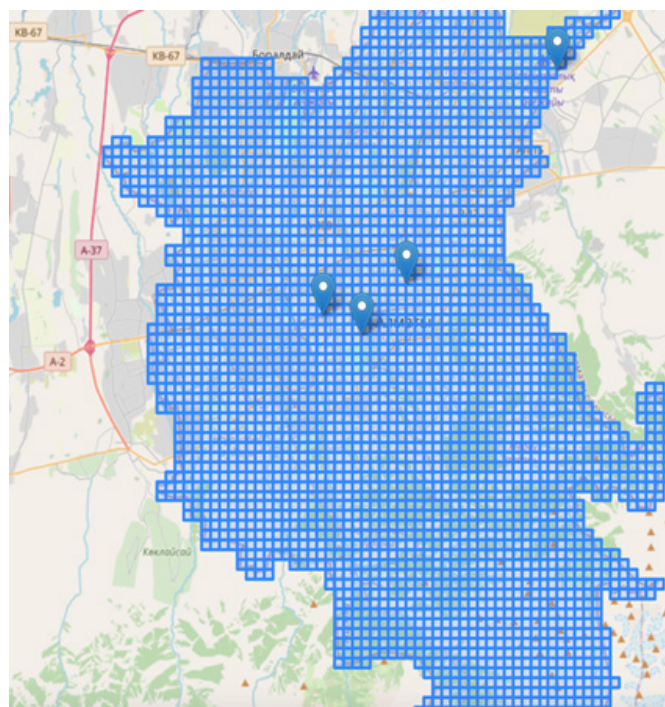


Рисунок 3 – Квадранты 500×500 м г. Алматы

В каждом квадранте формируется тепловая карта, отображающая уровень нагрузки в определенный час. Интенсивность нагрузки представляется в цветовой градации: красный цвет обозначает высокую нагрузку на квадрант, а синий – низкую нагрузку.

Визуализация распределения нагрузки по квадрантам приведена на рисунке 4.

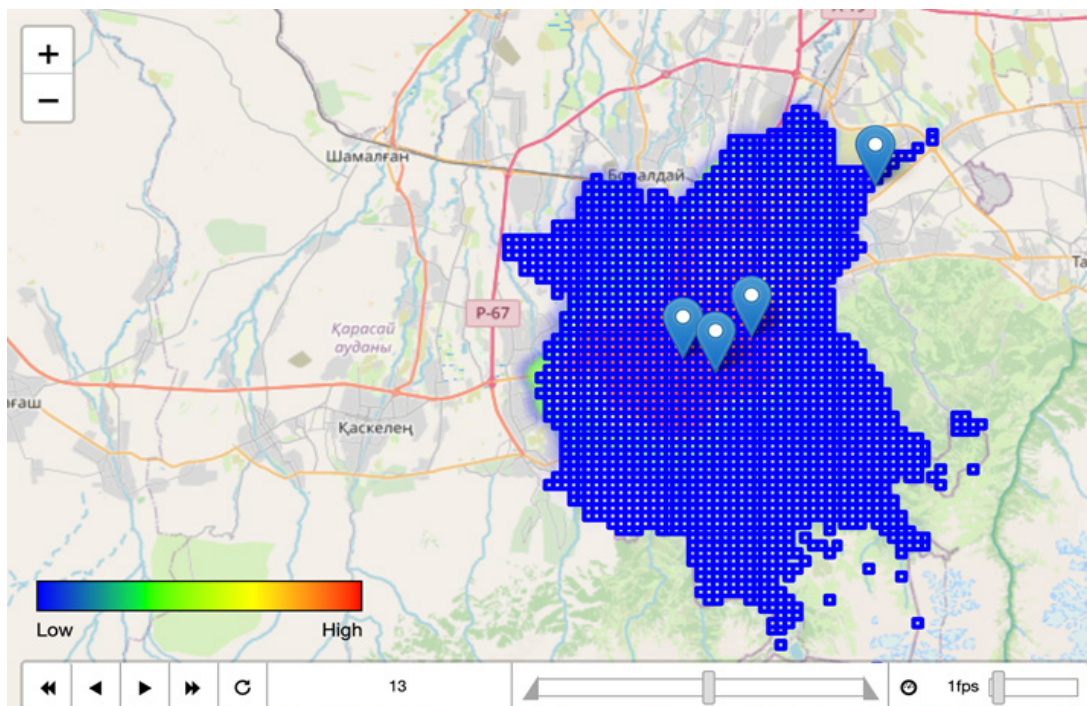


Рисунок 4 – Тепловая карта г. Алматы

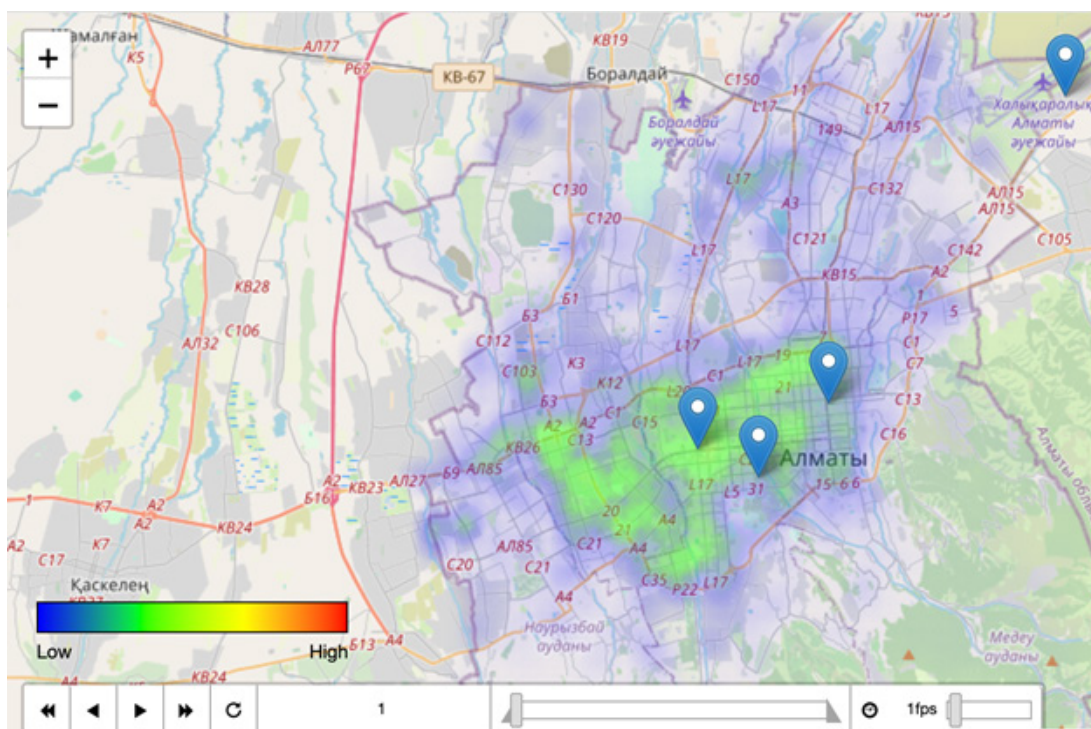


Рисунок 5 – Тепловая карта нагрузки пешеходного движения
в период с 01:00 до 01:59

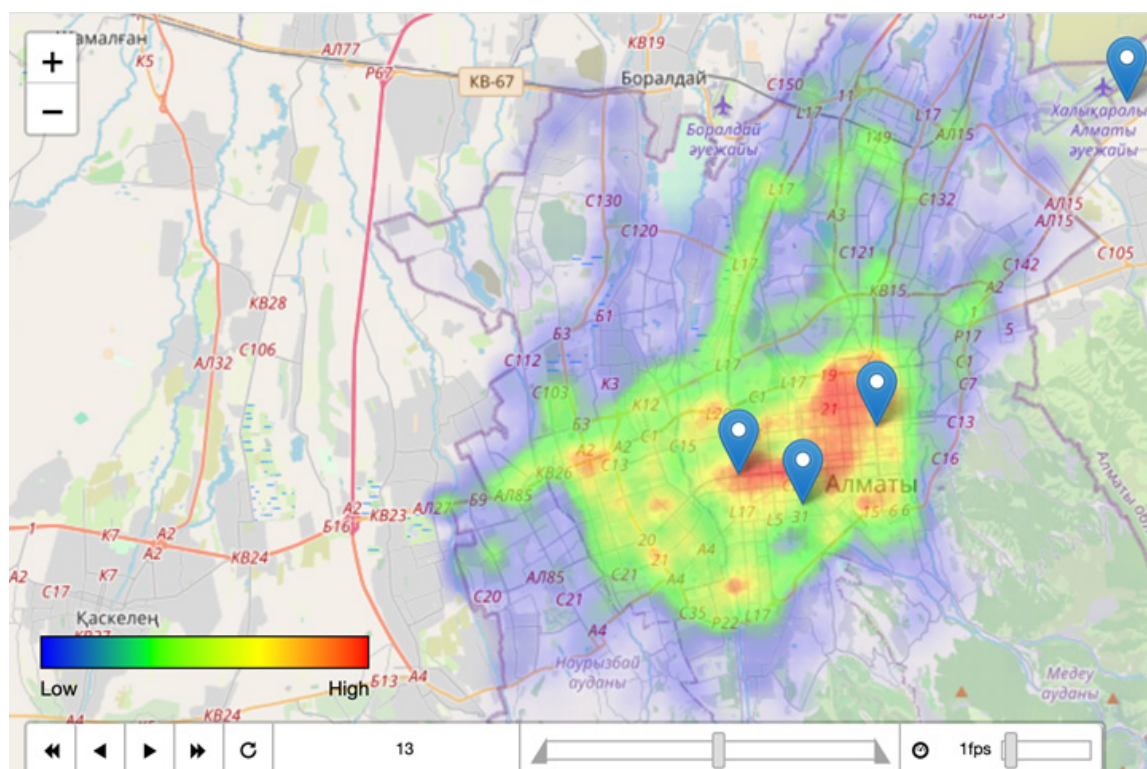


Рисунок 6 – Тепловая карта нагрузки пешеходного движения
в период с 13:00 до 13:59

Анализ визуализаций, представленных на рисунках 5–6, показывает, что нагрузка на город в ночное время существенно ниже по сравнению с дневными часами. Это подтверждается уменьшением концентрации активных зон и снижением интенсивности движения, что отражается в соответствующем изменении цветовой градации на тепловых картах.

Результаты и обсуждение

Были собраны данные о маршрутах общественного транспорта и расположении автобусных остановок в пределах городской территории г. Алматы. Данный набор данных предоставляет информацию о структуре транспортной сети, частоте движения маршрутов и доступности остановочных пунктов, что позволяет провести анализ эффективности работы общественного транспорта и выявить потенциальные зоны для оптимизации транспортной инфраструктуры. Данные включают следующие столбцы:

- 1) route_id – уникальный идентификатор маршрута
- 2) route_name – название маршрута (например, номер автобуса)
- 3) route_direction_index – индекс направления маршрута (обычно 0 или 1, указывая на разные направления движения)
- 4) route_direction_distance – дистанция маршрута в определенном направлении
- 5) stop_id – уникальный идентификатор остановки
- 6) stop_line_index – индекс остановки в маршруте
- 7) stop_offset_distance – смещение остановки относительно начала маршрута
- 8) stop_distance – расстояние от начала маршрута до данной остановки.

Несмотря на то что данные обладают относительно хорошо структурированным форматом, их удобство использования оставалось ограниченным. Для повышения доступности и упрощения обработки было принято решение объединить информацию в единый набор дан-

ных, содержащий детализированную информацию об автобусных маршрутах. В данной структуре каждая строка представляет собой отдельную остановку в рамках конкретного маршрута, что позволяет эффективно анализировать маршрутную сеть и проводить пространственные исследования транспортной инфраструктуры. Наиболее простой конструкцией для дальнейшего использования является плоская таблица.

Для упрощения процесса преобразования данных из массива объектов JSON был использован Python и его инструменты работы с данными. В частности, библиотека pandas применялась для эффективного объединения двух наборов данных, обеспечивая их структурированное представление и удобную обработку.

С целью последующего использования в вычислениях и анализа было принято решение сохранить преобразованный набор данных в формате Excel. Данный формат предоставляет возможность не только проводить визуальный анализ, но и обеспечивает совместимость с различными системами обработки данных.

Для преобразования структуры JSON-файла, содержащего информацию о маршрутах общественного транспорта, был разработан Python-скрипт, который на выходе формирует DataFrame в pandas. Полученный плоский объект DataFrame проиллюстрирован на рисунке 7.

```

• (work_venv_1) galym@MacBook-Pro-Galymzhan bus_routes % python3 main.py

```

	route_id	route_name	route_direction_index	route_direction_distance	stop_id	stop_line_index	stop_offset_distance	stop_distance
0	20807817	236	0	47605.71219	3217600	0.0	0.000000	15
1	20807817	236	0	47605.71219	1093984	15.0	61.687711	466
2	20807817	236	0	47605.71219	1098006	15.0	349.548082	755
3	20807817	236	0	47605.71219	3792746	18.0	83.285038	1246
4	20807817	236	0	47605.71219	1421777	34.0	45.454925	2277
5	20807817	236	0	47605.71219	3744482	35.0	20.955060	2664
6	20807817	236	0	47605.71219	1425799	35.0	330.269824	2973
7	20807817	236	0	47605.71219	1427810	36.0	55.346468	3342
8	20807817	236	0	47605.71219	1431832	40.0	458.159760	4233
9	20807817	236	0	47605.71219	4068253	40.0	802.033997	4579
10	20807817	236	0	47605.71219	4072275	45.0	539.802211	5470
11	20807817	236	0	47605.71219	1439876	48.0	127.215298	6252
12	20807817	236	0	47605.71219	1441887	50.0	91.414498	6744
13	20807817	236	0	47605.71219	9286798	69.0	97.349394	8642
14	20807817	236	0	47605.71219	9417513	86.0	37.475550	13014
15	20807817	236	0	47605.71219	1457975	94.0	150.255738	14450
16	20807817	236	0	47605.71219	9222446	102.0	58.764598	16590
17	20807817	236	0	47605.71219	11163061	142.0	365.038299	30351
18	20807817	236	0	47605.71219	11165072	143.0	138.117383	30692
19	20807817	236	0	47605.71219	11159039	146.0	102.456910	31447

Рисунок 7 – Плоский объект на маршрутах общественного транспорта в формате pandas dataframe

Аналогичным образом была выполнена трансформация структуры JSON-файла, содержащего данные об автобусных остановках, в формат pandas DataFrame. Этот процесс позволил представить информацию в удобной для анализа и обработки форме, обеспечивая унифицированное представление данных.

Полученный плоский объект DataFrame в формате pandas проиллюстрирован на рисунке 8.

```

• (work_venv_1) (work_venv_1) galym@MacBook-Pro-Galymzhan bus_routes % python3 main.py

```

	stop_id	stop_name	stop_long	stop_lat
0	2276452	Мкр. Водник	43.365114	76.852291
1	4502629	ЖК "Бай-Тал"	43.204574	76.869498
2	2270419	Боралдайский Аэропорт	43.355601	76.875335
3	2272430	Боралдайский Аэропорт	43.354778	76.876046
4	3485063	Село Жетыген	43.688565	77.126895
5	2057253	Дачи 4	43.204013	76.779832
6	2151770	Ул. Утемисова	43.309549	76.865689
7	2354881	Мкр. Акбулак	43.266359	76.829805
8	2688707	Зелёный базар	43.262731	76.955211
9	2736971	Ул. Кожабекова	43.200459	76.895008

```

○ (work_venv_1) (work_venv_1) galym@MacBook-Pro-Galymzhan bus_routes %

```

Рисунок 8 – Плоский объект на автобусных остановках в формате DataFrame pandas

Затем полученные два Dataframe объединяются в одну плоскую структуру с помощью операции левого соединения в библиотеке pandas:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	route_id	route_name	route_direction_index	route_direction_distance	stop_id	stop_line_index	stop_offset_distance	stop_distance	stop_name	stop_long	stop_lat
2	20807817	236	0	47605,71219	3217600	0	0	15	Аэрогостанция	43,235259	76,8181
3	20807817	236	0	47605,71219	1093984	15	61,68771134	466	ТЦ "Car city"	43,237091	76,821527
4	20807817	236	0	47605,71219	1098006	15	349,5480821	755	Теле би/Рассаи	43,237864	76,824921
5	20807817	236	0	47605,71219	3792746	18	83,28503842	1246	Момышулы/Теле би	43,239726	76,829423
6	20807817	236	0	47605,71219	1421777	34	45,45492512	2277	Райымбека/Момышулы	43,243095	76,826491
7	20807817	236	0	47605,71219	3744482	35	20,95505954	2664	Ул. Яссаи	43,241987	76,821977
8	20807817	236	0	47605,71219	1425799	35	330,2698238	2973	Супермаркет "SMALL"	43,241127	76,81836
9	20807817	236	0	47605,71219	1427810	36	55,346468	3342	Мкр. Акжент	43,24008	76,814042
10	20807817	236	0	47605,71219	1431832	40	458,1597598	4233	Авторын. "Жибек Жолы"	43,236177	76,80446
11	20807817	236	0	47605,71219	4068253	40	802,0339968	4579	Гор. больница №7	43,234608	76,800781
12	20807817	236	0	47605,71219	4072275	45	539,8022111	5470	Мкр. Теректы	43,232646	76,790337
13	20807817	236	0	47605,71219	1439876	48	127,2152978	6252	ТРК "Молла Апорт"	43,231645	76,780811
14	20807817	236	0	47605,71219	1441887	50	91,41449841	6744	Рынок "Алтын Орда"	43,230995	76,774816
15	20807817	236	0	47605,71219	9286798	69	97,34939442	8642	Мкр. Асыл Арман	43,22799	76,752
16	20807817	236	0	47605,71219	9417513	86	37,47555018	13014	Село Кумтоган	43,216741	76,700878
17	20807817	236	0	47605,71219	1457975	94	150,2557379	14450	Поворот на с. Алмалыбак	43,214125	76,683639
18	20807817	236	0	47605,71219	9222446	102	58,7645977	16590	Ул. Майса (г. Каскелен)	43,21702	76,657734
19	20807817	236	0	47605,71219	11163061	142	365,038299	30351	Ул. Макатаева	43,191951	76,538841
20	20807817	236	0	47605,71219	11165072	143	138,1173829	30692	Больница (с. Шамалган)	43,190259	76,535336
21	20807817	236	0	47605,71219	11159039	146	102,4569098	31447	Школа (с. Шамалган)	43,18711	76,52717
22	20807817	236	0	47605,71219	11171105	150	75,63185262	32127	Музей "Атамекен"	43,18483	76,51941
23	20807817	236	0	47605,71219	11175127	153	33,81226684	32949	Спортивная школа "Ушконыр"	43,181259	76,51055
24	20807817	236	0	47605,71219	11179149	221	139,2062222	41245	Ул. Ниязбекулы (с. Каргалы)	43,17934	76,41485
25	20807817	236	0	47605,71219	11181160	285	53,36195159	46970	Ул. Уалиханова (с. Каргалы)	43,17959	76,40596
26	20807817	236	0	47605,71219	10040923	288	70,50352594	47707	Гимназия №2	43,182237	76,399934
27	20807817	236	1	47822,95587	10040923	0	0	15	Гимназия №2	43,182237	76,399934
28	20807817	236	1	47822,95587	11177138	123	48,69102033	11984	Село Бекболат Ашенев	43,17351	76,48018

Рисунок 9 – Объединение данных о маршрутах общественного транспорта и автобусных остановках

В дальнейшем данный плоский файл Excel будет использоваться для визуализации маршрутов общественного транспорта г. Алматы с применением библиотеки Folium в Python. Это позволит наглядно отображать маршруты на интерактивной карте, анализировать их протяженность, выявлять возможные проблемные зоны и оценивать доступность общественного транспорта в различных районах города.

Заключение

В данной статье представлена модель пространственной агрегации городского населения г. Алматы с использованием тепловой карты. Анализ данных о маршрутах общественного транспорта и автобусных остановках позволил получить более детализированное представление о распределении населения в течение суток.

Результаты исследования демонстрируют существенные различия в плотности населения в зависимости от времени суток: в ночное время нагрузка на городскую инфраструктуру значительно ниже, чем в дневные часы, особенно в период максимальной деловой активности. Данная информация имеет ключевое значение для градостроителей, политиков и специалистов, занимающихся планированием городской среды, оптимизацией транспортных систем и развитием государственных услуг.

Использование библиотеки pandas в Python позволило преобразовать данные в структурированный формат, что способствовало их эффективному анализу и визуализации. В результате был сформирован плоский файл Excel, который представляет собой ценный информационный ресурс для дальнейших исследований и моделирования, особенно в контексте концепции «умного города».

Выводы, полученные в ходе данного исследования, могут стать основой для разработки целевых мер, направленных на повышение эффективности и устойчивого развития г. Алматы. Применение данных, основанных на аналитических подходах, и использование передовых технологий, таких как библиотека Folium в Python, создают предпосылки для формирования более устойчивой, инклюзивной и адаптивной городской среды, способной удовлетворять потребности как текущих, так и будущих поколений.

Информация о финансировании

Статья представляет результаты исследований, проведенных в рамках грантового финансирования на 2023–2025 гг. по проекту ИРН AP19674517 «Разработка интеллектуальной карты планирования и оценки эффективности городской инфраструктуры на основе моделей анализа человеческой деятельности в условиях городской среды». Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., & Zorzi, M. Internet of Things for Smart Cities. IEEE Internet of Things Journal, 2014. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>.
- 2 Alami A., Kusyk J., & Lefebvre E. Artificial Intelligence and Smart Cities: A Comprehensive Review. 9th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, 2019. <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8750074>.
- 3 Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., & Ayyash M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>.
- 4 Caragliu A., Del Bo C., & Nijkamp P. Smart Cities in Europe. Journal of Urban Technology, 2011. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117>.
- 5 Anthopoulos L.G. Understanding the smart city domain: A literature review. Smart Cities, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.006>.
- 6 Mendybayev T. and Mendybayev A. Assessing Urbanization Levels Using GeoData: Implications for Kazakhstan Regional Development Planning, 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), Astana, Kazakhstan, 2024, pp. 222–227. <https://doi.org/10.1109/SIST61555.2024.10629546>.
- 7 Singh A. and Kumar M. Data Urbanity: Smart City Evolution Through IoT and Data Science, 2023 3rd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), Bengaluru, India, 2023, pp. 63–71. <https://doi.org/10.1109/ICIMIA60377.2023.10426499>.
- 8 Ramanathan S., Syed K. and Chavan T. Data-driven visual analytics of Human Mobility data and green cover using Image Processing for Smart Cities. 2023 3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), Hubli, India, 2023, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/CONIT59222.2023.10205381>.
- 9 Mutzu Martis M., Garau C. A Literature Review of the Urban Heat Island (UHI) Phenomenon Connected with Smart Cities Paradigm. In: Gervasi O., Murgante B., Garau C., Tanar D., C. Rocha, A.M.A., Faginas Lago, M.N. (eds) Computational Science and Its Applications – ICCSA 2024 Workshops. ICCSA 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol. 14823. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65329-2_1.
- 10 Aziz N.S.A., Azri S., Ujang U., Darwin N., Choon T.L. Analyzing Urban Spatial Distribution in 2D and 3D for Smart City Planning and Zoning. In: Yadava, R.N., Ujang, M.U. (eds) Advances in Geoinformatics Technologies. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50848-6_18.
- 11 Orishimo I. An Approach to Urban Dynamics. Geographical Analysis, 2010, vol. 19, pp. 200–210. <https://doi.org/10.1111/J.1538-4632.1987.TB00125.X>.
- 12 Wang J., Wu J., Wang Z., Gao F., & Xiong Z. Understanding Urban Dynamics via Context-Aware Tensor Factorization with Neighboring Regularization. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2019, vol. 32, pp. 2269–2283. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2915231>.
- 13 Reia S., Rao P., Barthelmy M., & Ukkusuri S. Spatial structure of city population growth. Nature Communications, 2022, vol. 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33527-y>.
- 14 Yang X., Zhao Z., Shi C., Luo L., & Tu W. The Dynamic Heterogeneous Relationship between Urban Population Distribution and Built Environment in Xi'an, China: A Case Study. Remote. Sens., 2023, 15, 2257. <https://doi.org/10.3390/rs15092257>.
- 15 Scheuer S., Haase D., & Volk M. On the Nexus of the Spatial Dynamics of Global Urbanization and the Age of the City. PLoS ONE, 2016, 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160471>.

16 Anees M., Mann D., Sharma M., Banzhaf E., & Joshi P. Assessment of Urban Dynamics to Understand Spatiotemporal Differentiation at Various Scales Using Remote Sensing and Geospatial Tools. *Remote. Sens.*, 2020, vol.12, p. 1306. <https://doi.org/10.3390/rs12081306>.

17 Leibovici D., & Birkin M. On Geocomputational Determinants of Entropic Variations for Urban Dynamics Studies. *Geographical Analysis*, 2015, vol. 47, pp. 193–218. <https://doi.org/10.1111/GEAN.12050>.

18 Agunbiade M., Rajabifard A., & Bennett R. The dynamics of city growth and the impact on urban land policies in developing countries. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 2012, vol. 4, pp. 146–165. <https://doi.org/10.1080/19463138.2012.694818>.

19 Feng J., & Chen Y. Modeling Urban Growth and Socio-Spatial Dynamics of Hangzhou, China: 1964–2010. *Sustainability*, 2021. <https://doi.org/10.3390/SU13020463>.

20 Irwin E., Jayaprakash C., & Munroe D. Towards a comprehensive framework for modeling urban spatial dynamics. *Landscape Ecology*, 2009, vol. 24, pp. 1223–1236. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9353-9>.

21 Batty M. *The new science of cities*. MIT Press, 2018, 520 p.

22 Bektemyssova G., Moldagulova A., Shaikemelov G., Omarov S. and Nuralykyzy S. Research on spatial aggregation patterns of urban population in Almaty City based on heat map, 2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Vallette, Malta, 2024, pp. 2194–2198, <https://doi.org/10.1109/CoDIT62066.2024.10708175>.

¹Бектемысова Г.У.,

техн.ф.к., ORCID ID: 0000-0002-0850-0558,
e-mail: g.bektemisova@gmail.com

^{2*}Молдагулова А.Н.,

физ.-мат.ф.к., ORCID ID: 0000-0002-1596-561X,
*e-mail: a.moldagulova@satbayev.university

¹Шайкемелев Г.Т.,

докторант, ORCID ID: 0009-0001-6465-8894,
e-mail: g.shaikemelev@gmail.com

¹Омаров С.С.,

докторант, ORCID ID: 0009-0009-3371-9680,
e-mail: osskenesary@gmail.com

²Нуралыкызы С.,

докторант, ORCID ID: 0009-0004-2546-2751,
e-mail: s.nuralykyzy@satbayev.university

¹ Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы қ., Қазақстан

ЖЫЛУ КАРТАЛАРЫН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ҚАЛА ТҰРҒЫНДАРЫНЫҢ КЕҢІСТІКТІК ЖӘНЕ УАҚЫТТЫҚ АНАЛИТИКАСЫ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Халықтың қозғалысы мен тығыздығы туралы деректердің кеңістіктік-уақыттық талдауы smart қаланы құруда шешуші рөл атқарады, қала құрылысын оңтайландыруға, көлік жүйелерін жақсартуға, қоғамдық қауіпсіздікті арттыруға, қоршаған ортаны бақылауға, цифрлық қызметтер мен қалалық аналитиканы дамытуға негіз береді. Бұл мақалада динамикалық жылу карталары әдісін қолдану арқылы Алматы қаласының тұрғындарының таралуы мен шоғырлануының кеңістіктік және уақыттық заңдылықтарын зерттеу нәтижелері берілген. Халық қозғалысының, тығыздығының және белсенділігінің толық бейнесін құру үшін OpenStreetMap (OSM) ашық географиялық деректері және ұялы байланыс операторының жиынтық деректері пайдаланылды. OSM негізінде 500x500 метр өлшемді қалалық квадранттарға жүктемені талдау тәулік уақытына байланысты халық тығыздығының өзгеруінің негізгі заңдылықтарын бағалауға мүмкіндік берді.

Кеңістіктік-уақыттық деректерді визуализациялау визуалды интерактивті карталарды құруды қамтамасыз ететін Python Folium кітапханасының көмегімен жүзеге асырылды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы қала тұрғындарының динамикасының кеңістіктік және уақыттық ерекшеліктерін көрсететін әртүрлі көздерден алынған интеграцияланған деректер негізінде Алматы қаласындағы қалалық процестерді зерттеуде жатыр. Алынған нәтижелер ресурстар мен қалалық инфрақұрылымды бөлуді дәлірек болжау және жоспарлау үшін пайдаланылуы мүмкін халық шоғырлануының айқын үлгілерін көрсетеді.

Тірек сөздер: кеңістіктік-уақыттық аналитика, қала ортасы, халық тығыздығы, жылу картасы, қала құрылысы, OpenStreetMap, қаланың тұрақты дамуы.

¹Bektemyssova G.U.,

Candidate of Technical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-0850-0558,

e-mail: g.bektemisova@gmail.com

^{2*} Moldagulova A.N.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-1596-561X,

*e-mail: a.moldagulova@satbayev.university

¹Shaikemelev G.T.,

PhD student, ORCID ID: 0009-0001-6465-8894,

e-mail: g.shaikemelev@gmail.com

¹Omarov S.S.,

PhD student, ORCID ID: 0009-0009-3371-9680,

e-mail: osskenesary@gmail.com

²Nuralykyzy S.,

PhD student, ORCID ID: 0009-0004-2546-2751,

e-mail: s.nuralykyzy@satbayev.university

¹ International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

² Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan

SPATIOTEMPORAL ANALYTICS OF URBAN POPULATION USING HEAT MAPS

Abstract

Spatiotemporal analytics of population movement and density data plays a crucial role in building a «smart city», providing a basis for optimizing urban planning, improving transport systems, increasing public safety, environmental monitoring, developing digital services and urban analytics. This article presents the results of a study on spatiotemporal patterns of distribution and concentration of the population of Almaty using the method of dynamic heat maps. To build a complete picture of the movement, density and activity of the population, open geographic data from OpenStreetMap (OSM) and aggregated data from a mobile operator were used. Analysis of the load on urban quadrants of 500×500 meters based on OSM made it possible to assess the key patterns of change in population density depending on the time of day. Visualization of spatiotemporal data is implemented using the Python Folium library, which ensured the creation of clear interactive maps. The scientific novelty of the study lies in the study of urban processes in Almaty based on integrated data from different sources reflecting the spatiotemporal features of the dynamics of the urban population. The results obtained demonstrate clear patterns of population concentration that can be used to more accurately forecast and plan the allocation of resources and urban infrastructure.

Key words: spatio-temporal analytics, urban environment, population density, heat map, urban planning, OpenStreetMap, sustainable urban development.

Дата поступления статьи в редакцию: 14.02.2025