

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени А.О. Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»

Шакарова Дильназ Ерлановна
Осадчая Кристина Денисовна

Интеграция методов глубокого обучения и многокомпонентных ГИС для пространственного
анализа изменений городской среды на примере города Алматы

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07303 – Геопространственная цифровая инженерия

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А.Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»

6B07304 – Геопространственная цифровая инженерия

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Маркшейдерское дело и геодезия»
к.т.н., доц. профессор

Г. Мейрамбек
« 06 » 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающимся Осадчей Кристине Денисовне, Шакаровой Дильназ Ерлановне

Тема: «Интеграция методов глубокого обучения и многокомпонентных ГИС для пространственного анализа изменения городской среды на примере города Алматы»

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №26-П/Ө от 29.01.2025 г.

Срок сдачи законченной работы «30» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: Материал, накопленный во время производственной практики, и данные лекций.

Краткое содержание дипломной работы:

- Пространственный анализ компонентов городской среды
- Анализ данных температуры поверхности, пространственное моделирование уровня шумового загрязнения
- Анализ загрязнения атмосферного воздуха на основе спутниковых данных Sentinel-5P;

Перечень графического материала: представлены 20 слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература:

1. Gao, Z., Wu, Z., Zhang, X., Wang, Y., & Zhang, J. Deep learning for urban land use category classification: A review and experimental assessment // Sustainable Cities and Society. 2024.

2. Neysani, B., Khosravi, H., Mohammadi, M., & Gholami, M. Assessment of noise pollution-prone areas using an explainable geospatial artificial intelligence approach // Environmental Advances. 2024.

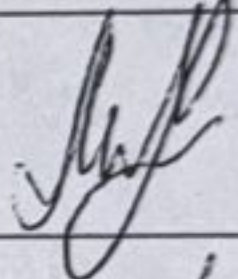
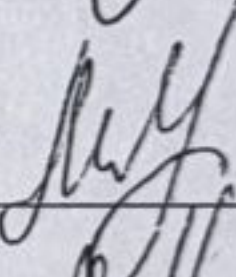
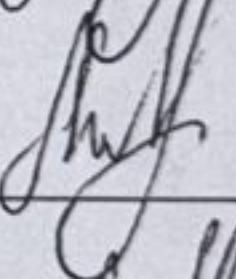
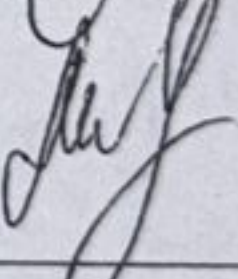
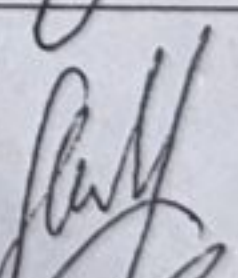
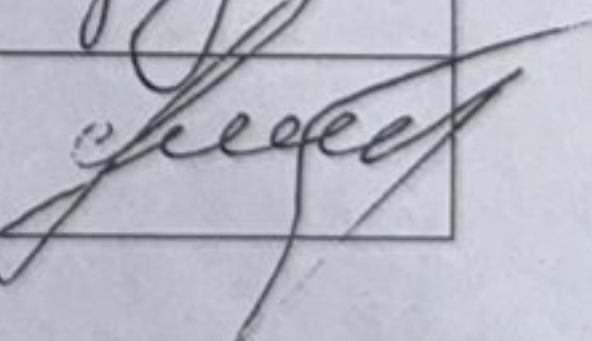
3. Галерея уроков ArcGIS Pro

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

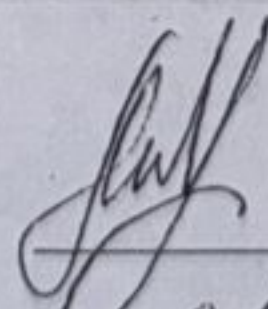
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Общие сведения об изменении городской среды и применение глубокого обучения в ГИС	27.02.2025	_____
Изучение влияния застройки на температурный режим	19.03.2025	_____
Геоинформационное моделирование шумового загрязнения	09.04.2025	_____

Подписи

консультантов и норм контролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

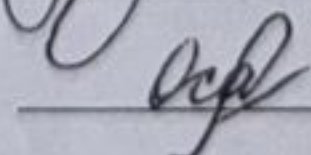
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Общие сведения	А. Ержанқызы PhD, Старший преподаватель	27.02.25	
Пространственный анализ компонентов городской среды	А. Ержанқызы PhD, Старший преподаватель	10.03.25	
Влияние застройки и озеленения на температурный режим городской территории	А. Ержанқызы PhD, Старший преподаватель	19.03.25	
Геоинформационное моделирование шумового загрязнения в городской территории	А. Ержанқызы PhD, Старший преподаватель	09.04.25	
Анализ загрязнения атмосферного воздуха на основе спутниковых данных Sentinel-5P	А. Ержанқызы PhD, Старший преподаватель	15.04.25	
Нормоконтролер	Г. С. Мадимарова к.т.н., ассоц. профессор	09.06.25	

Научный руководитель

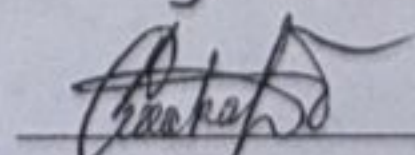


Ержанқызы А.

Задание приняли к исполнению обучающиеся



Осадчая К.Д.



Шакарова Д.Е.

Дата

« 10 » 06 2025 г

АНДАТПА

Алматы сияқты ірі мегаполистердің қарқынды урбанизациялануы жағдайында қалалық ортаның кеңістіктік өзгерістерін жан-жақты талдау аса маңызды. Осы зерттеуде спутниктік, векторлық және статистикалық деректерді біріктіруге мүмкіндік беретін геоақпараттық жүйелерді (ГАЖ) пайдалану арқылы қалалық құрылымның трансформациясын бағалаудың әдістемесі ұсынылады. Зерттеу аясында кеңістіктік ақпаратты жинау және өңдеу, урбандалған аумақтар мен құрылыс тығыздығын талдау, жер беті температурасының (LST) спутниктік суреттер негізінде есептелуі, құрылыс пен өсімдіктер жамылғысының температуралық жағдайларға әсерін регрессиялық талдау, сондай-ақ көлік инфрақұрылымын ескере отырып, шуылдық ластану деңгейін модельдеу жұмыстары жүргізілді. Алынған нәтижелер антропогендік жүктемені кешенді бағалауға және қалалық аумақтың тұрақты дамуын жоспарлауға мүмкіндік береді.

АННОТАЦИЯ

В условиях стремительной урбанизации мегаполисов, таких как Алматы, необходимо проводить комплексный анализ пространственных изменений городской среды. В данной работе представлена методика оценки трансформации городской структуры с использованием геоинформационных систем (ГИС), обеспечивающих интеграцию спутниковых, векторных и статистических данных. Проведены сбор и обработка пространственной информации, анализ урбанизированных зон и плотности застройки, расчёт температуры поверхности (LST), регрессионный анализ влияния застройки и зелёных насаждений на температурные условия, а также моделирование шумового загрязнения с учётом транспортной инфраструктуры. Полученные результаты позволяют всесторонне оценить антропогенную нагрузку и применить их для планирования устойчивого развития городской территории.

ANNOTATION

In the context of rapid urbanization in megacities such as Almaty, it is essential to conduct a comprehensive analysis of spatial changes in the urban environment. This study presents a methodology for assessing urban structure transformation using Geographic Information Systems (GIS), which enable the integration of satellite, vector, and statistical data. The research includes the collection and processing of spatial information, analysis of urbanized areas and building density, calculation of land surface temperature (LST), regression analysis of the impact of built-up areas and vegetation on thermal conditions, and modeling of noise pollution considering transportation infrastructure. The results provide a thorough assessment of anthropogenic pressure and can be used for sustainable urban development planning.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Общие сведения	10
2 Пространственный анализ компонентов городской среды	12
2.1 Динамика территориального расширения города Алматы	12
2.2 Картографический анализ плотности улично-дорожной сети	14
2.3 Комплексное определение урбанизированных территорий с применением индекса NDBI и метода горячих точек (Hot Spot Analysis)	16
3. Влияние застройки и озеленения на температурный режим городской территории	23
3.1 Получение и анализ данных температуры поверхности (LST) на основе спутниковых наблюдений	23
3.2. Пространственно-статистическое моделирование температуры с использованием регрессионного анализа	27
3.3. Оценка теплового риска на основе индекса Heat Risk Index (HRI)	33
4. Геоинформационное моделирование шумового загрязнения в городской территории	36
4.1 Пространственное моделирование уровня шумового загрязнения на основе данных OpenStreetMap и инструментов ArcGIS Pro	36
4.2 Обработка данных аэрофотосъемки	43
4.3 Повышение точности оценки шумового загрязнения с учетом вертикальной застройки и экранов	47
4.4 Прогнозирование уровня шумового загрязнения с использованием модели Random Forest	51
5. Анализ загрязнения атмосферного воздуха на основе спутниковых данных sentinel-5p	53
5.1. Теоретическое обоснование и актуальность	53
5.2. Методика обработки данных и описание скрипта в Google Earth Engine	54
5.3. Результаты анализа и интерпретация	56
Заключение	58
Список использованной литературы	59

ВВЕДЕНИЕ

Современные мегаполисы, такие как Алматы, развиваются под воздействием сложных взаимосвязанных процессов: роста плотности застройки, изменения структуры землепользования, увеличения численности населения и усиления экологических нагрузок. Эти трансформации формируют динамичную городскую среду, мониторинг и анализ которой требуют междисциплинарного подхода и передовых технологий. Геоинформационные системы (ГИС), интегрирующие данные дистанционного зондирования, векторные слои и статистические показатели, обеспечивают эффективный инструмент для анализа и визуализации пространственных изменений. В сочетании с методами глубокого обучения, которые автоматизируют обработку больших массивов данных и выявляют сложные закономерности, ГИС позволяют проводить всестороннюю оценку урбанизационных процессов и их последствий.

Город Алматы, крупнейший мегаполис Казахстана, демонстрирует интенсивные пространственные изменения, обусловленные активным расширением застроенных территорий, сокращением зелёных зон, ростом транспортной нагрузки и трансформацией микроклиматических условий. Географическое положение города в предгорной зоне, сложный рельеф и климатические особенности создают дополнительные вызовы для устойчивого управления городской территорией. В условиях стремительной урбанизации возрастает потребность в технологиях, способных не только фиксировать изменения, но и моделировать их влияние на экологические и социальные аспекты городской среды.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке комплексной методики, которая объединяет разнородные пространственные данные и передовые аналитические инструменты для изучения урбанизационных процессов. Такой подход позволяет не только фиксировать текущие изменения, но и выявлять долгосрочные тренды, влияющие на экологическую устойчивость мегаполиса. Использование моделей глубокого обучения, таких как U-Net и Random Forest, расширяет возможности анализа за счет автоматического обнаружения скрытых закономерностей в данных, что особенно важно для крупных городов с высокой динамикой изменений.

Целью данной работы является разработка методики комплексной оценки трансформаций городской структуры с использованием интеграции многокомпонентных ГИС и методов глубокого обучения на примере города Алматы. Для достижения этой цели были выполнены следующие задачи: сбор и обработка пространственных данных, включая спутниковые снимки, векторные слои и статистические показатели; анализ плотности застройки и урбанизированных зон с применением индекса NDBI и метода горячих точек; расчёт температуры поверхности (LST) на основе данных Landsat 8; регрессионный анализ влияния застройки и зелёных насаждений на микроклиматические параметры; моделирование шумового загрязнения с учётом транспортной инфраструктуры и этажности зданий; прогнозирование

уровня шума с использованием модели Random Forest; анализ загрязнения атмосферного воздуха на основе спутниковых данных Sentinel-5P.

В рамках исследования применялись данные OpenStreetMap, спутниковые снимки Landsat 8, данные АФС, растровые покрытия ESA WorldCover и продукты Sentinel-5P, обработанные с использованием ArcGIS Pro и Google Earth Engine. Пространственный анализ включал картографирование плотности улично-дорожной сети, классификацию типов землепользования с помощью модели U-Net, оценку теплового риска на основе индекса HRI и визуализацию распределения диоксида азота (NO_2). Регрессионный анализ выявил статистически значимые зависимости между плотностью застройки, озеленением и температурой поверхности, а моделирование шумового загрязнения позволило определить зоны с высокой акустической нагрузкой.

Кроме того, исследование подчеркивает роль географических и климатических особенностей Алматы в формировании уникальных вызовов для городской среды. Предгорное расположение и сложный рельеф усиливают влияние урбанизации на микроклимат и загрязнение воздуха, что требует учета этих факторов при анализе данных. Интеграция спутниковых и наземных источников информации в рамках ГИС обеспечивает целостное понимание этих процессов, создавая основу для дальнейших теоретических разработок в области устойчивого управления мегаполисами.

Полученные результаты обеспечивают всестороннюю оценку антропогенной нагрузки на городскую среду Алматы, выявляя ключевые тенденции урбанизации и их воздействие на микроклимат, уровень шума и качество воздуха. Интеграция ГИС и методов глубокого обучения позволила провести точный анализ пространственных изменений.

1 Общие сведения

Алматы — крупнейший мегаполис Казахстана, выполняющий ключевую роль как в социально-экономическом развитии страны, так и в формировании культурной, образовательной и научной среды региона. Город отличается высокой степенью привлекательности, особенно среди молодёжи, благодаря развитой инфраструктуре, широким возможностям трудоустройства, наличию ведущих вузов и разнообразию городских сервисов. Эти факторы обеспечивают стабильный приток населения, что, в свою очередь, становится движущей силой пространственной трансформации и ускоренного урбанистического роста.

Процессы урбанизации в Алматы сопровождаются не только увеличением численности населения, но и стремительным расширением городской территории. Пригородные зоны активно вовлекаются в городскую структуру, ранее незастроенные участки осваиваются под жилые и коммерческие нужды, что приводит к изменению функционального зонирования и архитектурного облика города. Территориальное расширение сопровождается масштабным развитием транспортной и инженерной инфраструктуры: прокладываются новые автомагистрали, возводятся жилые массивы, уплотняется историческая застройка. Всё это ведёт к росту антропогенной нагрузки и трансформации природных и климатических условий на урбанизированных территориях.

Одним из наиболее ощутимых следствий интенсификации застройки становится изменение микроклимата. В частности, высокая плотность зданий, уменьшение доли озеленённых пространств и обширное асфальтовое покрытие усиливают эффект "городского теплового острова" (Urban Heat Island, UHI), способствующий локальному перегреву поверхности. Для анализа таких процессов активно используются методы дистанционного зондирования Земли, в частности оценка температуры земной поверхности (Land Surface Temperature, LST) на основе спутниковых данных. Это позволяет выявлять зоны перегрева, проводить пространственный анализ микроклиматических рисков и разрабатывать рекомендации по озеленению и смягчению тепловой нагрузки.

Не менее важной проблемой, связанной с ростом городской активности, является шумовое загрязнение. Повышение интенсивности транспортных потоков, особенно в центральных районах и вдоль магистральных дорог, ведёт к значительному росту уровня шума, оказывающего негативное влияние на здоровье и качество жизни горожан. Моделирование шумового фона на основе пространственных данных, включающих транспортную инфраструктуру, плотность и этажность застройки, даёт возможность выявлять участки с критическим акустическим воздействием и планировать мероприятия по его снижению.

Алматы также сталкивается с выраженными проблемами атмосферного загрязнения. Существенный вклад вносит автотранспорт, а также деятельность теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), расположенных вблизи городской черты. Высокие концентрации диоксида азота (NO_2), фиксируемые как наземными постами мониторинга, так и спутниковыми платформами, представляют собой

серьёзную угрозу для здоровья населения. Геопространственный анализ распределения загрязняющих веществ позволяет детально картографировать экологическую ситуацию и выявлять зоны с наибольшим экологическим риском.

Совокупность этих факторов — стремительный рост населения, расширение городской территории, уплотнение застройки, усиление эффекта теплового острова, рост уровня шума и загрязнения воздуха — делает необходимым применение современных, междисциплинарных аналитических подходов. Интеграция многокомпонентных геоинформационных систем с методами глубокого обучения обеспечивает возможность автоматизированной обработки больших массивов пространственных данных, выявления скрытых закономерностей урбанизационных процессов и построения прогностических моделей. Это особенно актуально для таких быстроразвивающихся и экологически уязвимых мегаполисов, как Алматы, где устойчивое планирование и управление городской средой требует научно обоснованной поддержки и глубокой пространственной аналитики.

2 Пространственный анализ компонентов городской среды

2.1 Динамика территориального расширения города Алматы

За последние десятилетия Алматы демонстрирует чётко выраженную и устойчивую тенденцию пространственного роста, обусловленную как увеличением численности населения, так и активными урбанизационными процессами. Расширение городской территории стало объективной необходимостью для удовлетворения растущего спроса на жильё, развитие транспортной, социальной и инженерной инфраструктуры, а также для эффективного территориального планирования в условиях динамичного мегаполиса.

Ключевым этапом в этом процессе стало административное расширение в 2014 году, когда по решению городского маслихата от 2 июля были официально присоединены земли Карасайского района Алматинской области. В результате этого территориального преобразования был образован новый — восьмой — Наурызбайский район. В его состав вошли десять сельских населённых пунктов: Жайлау, Карагайлы, Курамыс, Рахат, Каргалы, Таусамалы, Акжар, Тастыбулак, Таужолы и Шугыла, а также микрорайон Калкаман, ранее административно подчинявшийся Ауэзовскому району города.

Присоединённая территория охватила площадь 6 967 гектаров. Земельная структура включала 590 крестьянских хозяйств (2 133 га), 11 528 участков, предназначенных для индивидуального жилищного строительства и ведения личных подсобных хозяйств (1 741 га), 3 759 дачных участков (314 га), 143 участка под многоквартирную застройку (163 га), 961 участок коммерческого назначения (1 052 га) и 1 565 гектаров земель, занятых объектами инженерной, транспортной инфраструктуры и неразграниченными территориями.

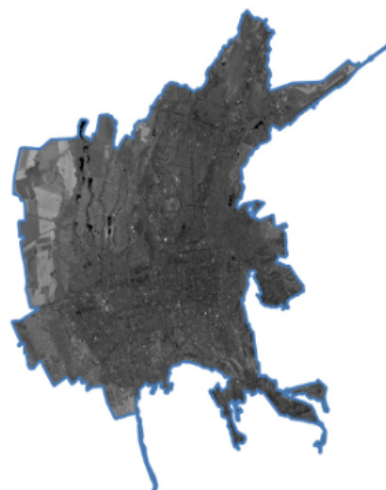
Дополнительно, в рамках этого расширения в черту Алматы были официально включены участки, ранее находившиеся в пределах Алматинской области. В частности, на основании судебного решения к городу перешёл участок, находившийся в собственности ТОО «Международная ассоциация клубов». Эти преобразования потребовали не только корректировки административных границ, но и масштабной работы по интеграции новых территорий в городскую систему управления, развитию инфраструктуры, повышению уровня благоустройства и обеспечению градостроительной согласованности.

С целью более детального анализа процессов территориального развития была выполнена ретроспективная реконструкция административных границ Алматы по состоянию на 1978, 2003, 2012 и 2014 годы (рис. 1–2). Историческая граница конца 1970-х была восстановлена по архивной карте города (рис. 3). Контур 2003 года был реконструирован на основе опубликованных генеральных планов, размещённых в специализированных картографических архивах. Границы на 2012 и 2014 годы были воссозданы по официальным схемам, приложенным к нормативным документам, регламентирующим

территориальные изменения. На основании этих оцифрованных границ были вырезаны соответствующие участки спутниковых снимков, что позволило визуализировать и проанализировать динамику пространственного роста города.



Границы города Алматы 1978 г.



Границы города Алматы 2003 г.

Рисунок 1 — Изменение городских границ города Алматы за 1978 и 2003 гг.



Границы города Алматы 2012 г.



Границы города Алматы 2014-2025 гг.

Рисунок 2 — Изменение городских границ города Алматы за 2012 и 2014 гг.



Рисунок 3 — Архивная карта города Алматы

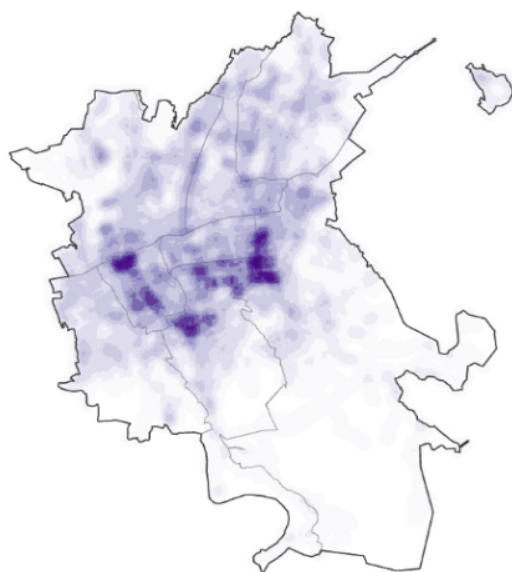
Ретроспективный анализ позволил проследить последовательность и масштабы территориальных изменений города Алматы, а также зафиксировать ключевые этапы его пространственного развития на основе объективных картографических данных. Сопоставление данных за разные годы обеспечило более полное понимание того, как формировалась современная структура города и каким образом происходило включение новых территорий в его состав. Такой подход подтвердил эффективность использования картографических и дистанционных источников для изучения динамики административных границ и может быть применён в дальнейшем для анализа урбанизационных процессов в других регионах.

2.2 Картографический анализ плотности улично-дорожной сети

Рост площади застройки в Алматы сопровождался значительным развитием транспортной инфраструктуры, что является важным индикатором усиливающейся урбанизации. Одним из ключевых элементов в этом процессе выступает улично-дорожная сеть, структура и плотность которой

непосредственно связаны с уровнем освоения территорий и функциональной связностью городской среды. Для анализа пространственного распределения дорог были использованы векторные данные OpenStreetMap, а в качестве метода оценки — ядровая интерполяция (Kernel Density Estimation). Суть метода заключается в том, что каждая линия (в данном случае — участок дороги) вносит вклад в значения плотности в пределах определённого радиуса вокруг себя. Вклад уменьшается с увеличением расстояния от объекта, что моделируется с помощью ядра — математической функции, плавно распределяющей влияние объекта на окружающее пространство. В результате получается растр, где значения пикселей отражают относительную плотность объектов на местности (рис. 4).

Плотность дорожной сети 2020 г.



Плотность дорожной сети 2025 г.

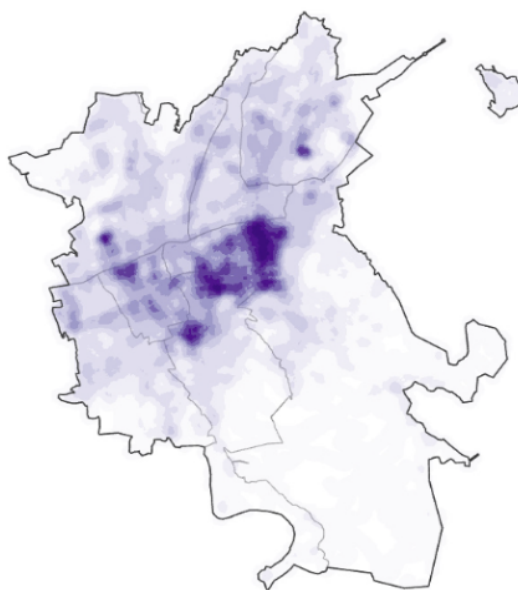


Рисунок 4 — Карты плотности распределения дорог за 2020 и 2025 гг.

Анализ данных за два временных среза показал устойчивую тенденцию к увеличению плотности улично-дорожной сети на территории города. Наибольшая концентрация транспортных узлов выявлена в Алмалинском, Бостандыкском и Ауэзовском районах, характеризующихся высокой плотностью населения и активным строительством. Это указывает на наличие прямой связи между уровнем урбанизации и развитием транспортной инфраструктуры. Таким образом, рост транспортной инфраструктуры отражает расширение городской застройки и потребность в обеспечении транспортной связанности новых районов. Пространственный анализ позволяет визуализировать эти процессы и служит основой для планирования устойчивого развития городской среды (рис. 5)

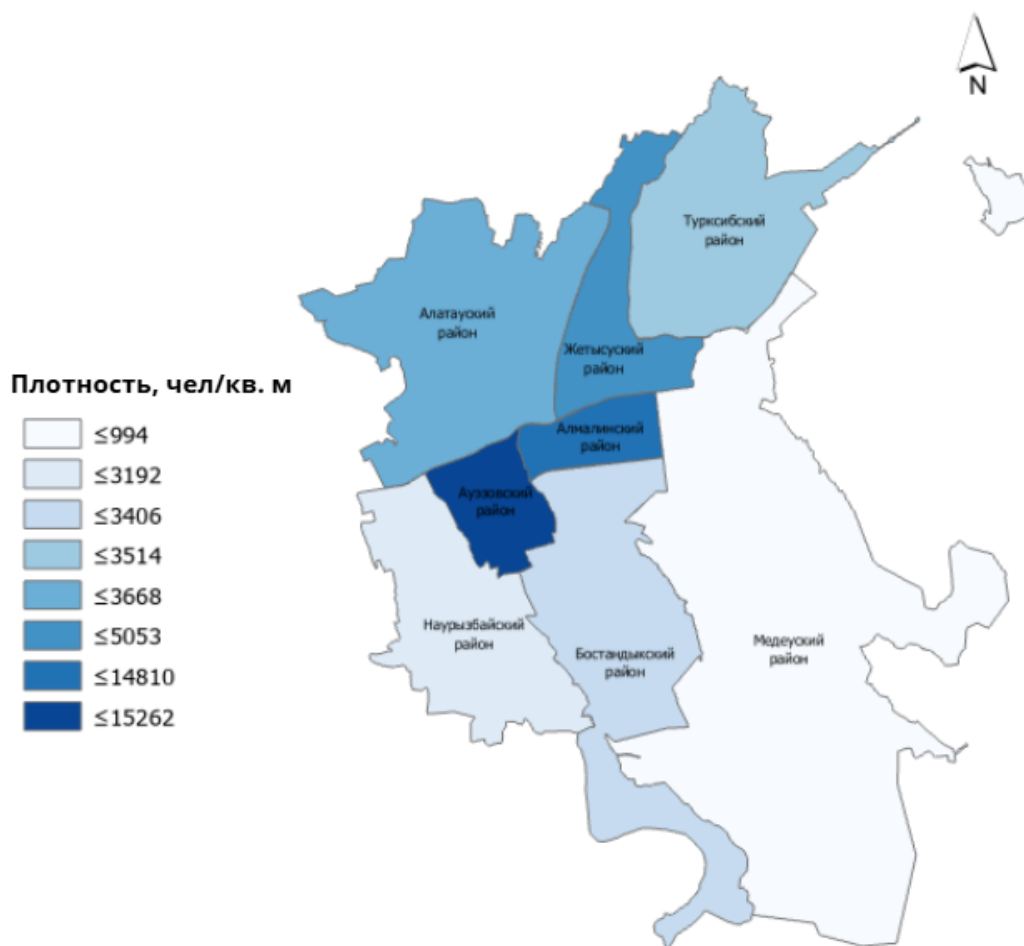


Рисунок 5 — Карта плотности населения г. Алматы

2.3 Комплексное определение урбанизированных территорий с применением индекса NDBI и метода горячих точек (Hot Spot Analysis)

Для комплексной оценки урбанизированных территорий были применены методы, позволяющие выявить как количественные, так и пространственные особенности застройки. Индекс застроенности (NDBI) обеспечил возможность определить распределение плотных застроек на основе спутниковых данных, в то время как пространственный анализ горячих точек позволил локализовать статистически значимые кластеры концентрации зданий. Совокупное использование этих подходов позволило получить многослойное представление об уровне урбанизации в пределах городской территории.

Одним из направлений анализа городской среды в рамках данного исследования стало выделение застроенных участков с применением нормализованного индекса застроенности (NDBI). Этот индекс рассчитывается на основе спектральных различий между урбанизированными объектами и

природными поверхностями и широко применяется в задачах дистанционного зондирования.

Для оценки динамики застройки использовались спутниковые изображения Landsat 8 за 2014 и 2024 годы. Индекс NDBI вычисляется по формуле (1):

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}, \quad (1)$$

где SWIR — отражательная способность в среднем инфракрасном диапазоне (канал 6),

а NIR — в ближнем инфракрасном диапазоне (канал 5).

Значения индекса варьируются от -1 до $+1$: положительные соответствуют потенциально застроенным участкам, отрицательные — природным покровам, таким как растительность или водные объекты.

Однако применение этого подхода в условиях города Алматы показало ряд ограничений. Из-за специфики ландшафта и наличия открытых участков, таких как пустыри и горные склоны, индекс может ошибочно классифицировать их как застроенные зоны. Это связано с тем, что оголённые породы и грунты также имеют высокую отражательную способность в SWIR-диапазоне, сходную с характеристиками искусственных поверхностей.

Несмотря на эти ограничения, расчёт NDBI позволил наметить зоны вероятного расширения урбанизированной территории, а также сформировать представление о характере пространственных изменений за десятилетие (рис. 6). Эти данные служат предварительным ориентиром для дальнейшего анализа, и их точность может быть дополнительно уточнена с помощью рельефных масок или классифицированных слоёв земного покрова.

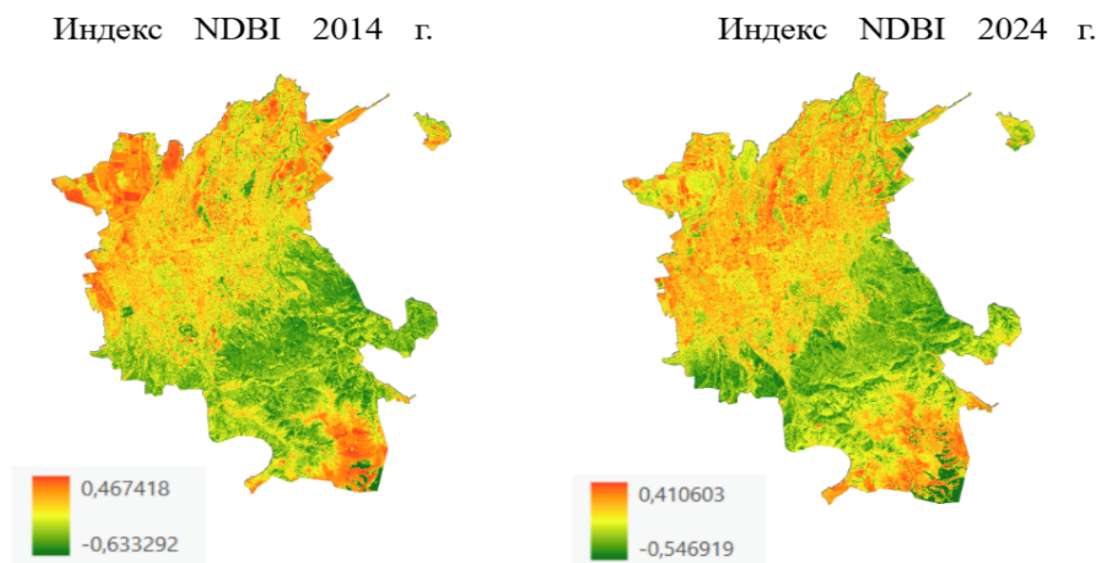


Рисунок 6 — Картографирование индекса NDBI за 2014 и 2024 годы

Для дополнительной оценки пространственного распределения застройки был выполнен анализ кластеров плотности зданий с использованием метода Hot

Spot Analysis (Getis-Ord G_i^*). В рамках подготовки к анализу полигональный слой зданий, полученный из OpenStreetMap, был преобразован в точечный формат — каждая точка соответствовала центру отдельного здания. После преобразования был применен инструмент горячих точек, позволяющий определить участки, где застройка формирует статистически значимые скопления.

Результатом стала тематическая карта, на которой обозначены участки с высокой (hot spots) и низкой (cold spots) плотностью зданий (рис. 7). Проведенный анализ позволил выявить зоны интенсивной застройки и дополнить понимание распределения урбанизированных территорий в пределах города Алматы.

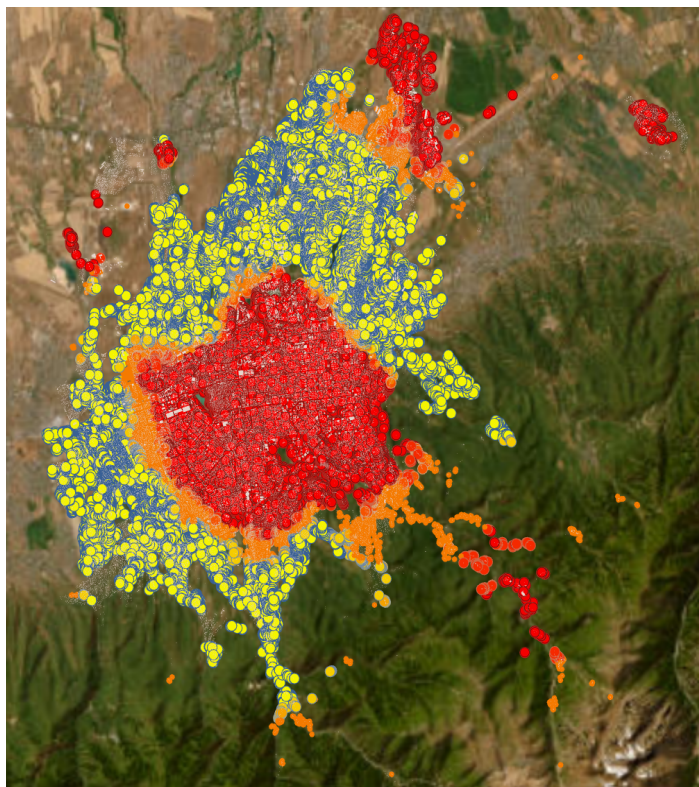


Рисунок 7 — Карта плотности зданий

Для оценки урбанизированных территорий на основе спутниковых данных была использована модель Land Cover Classification Using Landsat 8, разработанная компанией Esri и доступная через платформу ArcGIS. Эта модель основана на архитектуре U-Net, представляющей собой тип сверточной нейронной сети, специально разработанный для задач семантической сегментации спутниковых изображений. Её структура включает два основных этапа: сначала происходит поэтапное сжатие изображения с одновременным извлечением значимых пространственных признаков, затем — восстановление исходного разрешения с использованием этих признаков для точного позиционирования объектов. Важной особенностью U-Net является наличие пропусков между слоями сжатия и восстановления, что обеспечивает

одновременное сохранение контекста и точности пространственной локализации. Такой подход позволяет эффективно классифицировать каждый пиксель изображения, включая участки со смешанным покровом или сложной структурой, что особенно актуально при анализе городской застройки.

Модель работает с многополосными изображениями Landsat 8, включая такие ключевые каналы как SWIR (средний ИК), NIR (ближний ИК), красный, синий и зелёный, а также панхроматический канал при необходимости. Это обеспечивает устойчивую работу алгоритма даже в условиях схожих спектральных характеристик различных объектов. На выходе модель классифицирует каждый пиксель по одному из 13 заранее определённых классов земного покрова, среди которых — открытые водные поверхности, снежный покров, сельскохозяйственные угодья, леса, кустарники и застройка различной интенсивности. Для оценки точности модели можно сослаться на сводную таблицу, в которой содержатся значения **Precision, Recall и F1**-score для каждого из 13 классов. Эти метрики показывают, насколько точно модель классифицирует пиксели в каждой категории и позволяют оценить общее качество работы алгоритма (таб. 1).

Таблица 1 — Сводная таблица для оценки точности классификации типов землепользования

Class	Collection 2 Level 2 Imagery			Collection 1 Level 1 Imagery		
	Precision	Recall	F1 Score	Precision	Recall	F1 Score
Open Water	0.96	0.97	0.96	0.95	0.97	0.96
Perennial Snow/Ice	0.86	0.69	0.77	0.49	0.94	0.64
Developed, Open Space	0.51	0.38	0.44	0.43	0.38	0.4
Developed, Low Intensity	0.52	0.46	0.49	0.47	0.48	0.47
Developed, Medium Intensity	0.54	0.5	0.52	0.49	0.54	0.51
Developed, High Intensity	0.67	0.54	0.6	0.55	0.68	0.61
Barren Land	0.76	0.59	0.66	0.6	0.77	0.68
Deciduous Forest	0.74	0.81	0.78	0.78	0.76	0.77
Evergreen Forest	0.77	0.82	0.79	0.8	0.82	0.81
Mixed Forest	0.56	0.47	0.51	0.5	0.53	0.51
Shrub/Scrub	0.82	0.82	0.82	0.84	0.81	0.83
Herbaceous	0.78	0.74	0.76	0.79	0.77	0.78
Hay/Pasture	0.7	0.74	0.72	0.67	0.75	0.71
Cultivated Crops	0.87	0.91	0.89	0.91	0.9	0.9
Woody Wetlands	0.7	0.68	0.69	0.67	0.68	0.68
Emergent Herbaceous Wetlands	0.72	0.54	0.62	0.54	0.61	0.57

Для анализа динамики роста урбанизированных территорий модель была поочерёдно применена к двум многоканальным спутниковым снимкам Landsat 8

— за 2014 и 2024 годы. Каждый из снимков был предварительно подготовлен: из отдельных каналов был сформирован единый многополосный растр, затем выполнена обрезка по административной границе города Алматы, что позволило сконцентрироваться исключительно на городской территории. В результате были получены два тематических растровых слоя, содержащих пространственное распределение классов земного покрова с детализацией до уровня пикселя.

Анализ результатов показал значительный рост площади урбанизированных зон, особенно классов «Застройка со средней плотностью» и «Застройка с высокой плотностью», в Ауэзовском, Алмалинском, Наурызбайском и Жетысуском районах (рис. 8–10). Эти территории в 2024 году демонстрируют наибольшую концентрацию интенсивной застройки по сравнению с 2014 годом. При этом можно заметить, что ранее частично застроенные участки, классифицированные как «Застройка с низкой плотностью» и «Открытые застроенные пространства», перешли в более высокие классы плотности застройки, что указывает на уплотнение городской структуры.

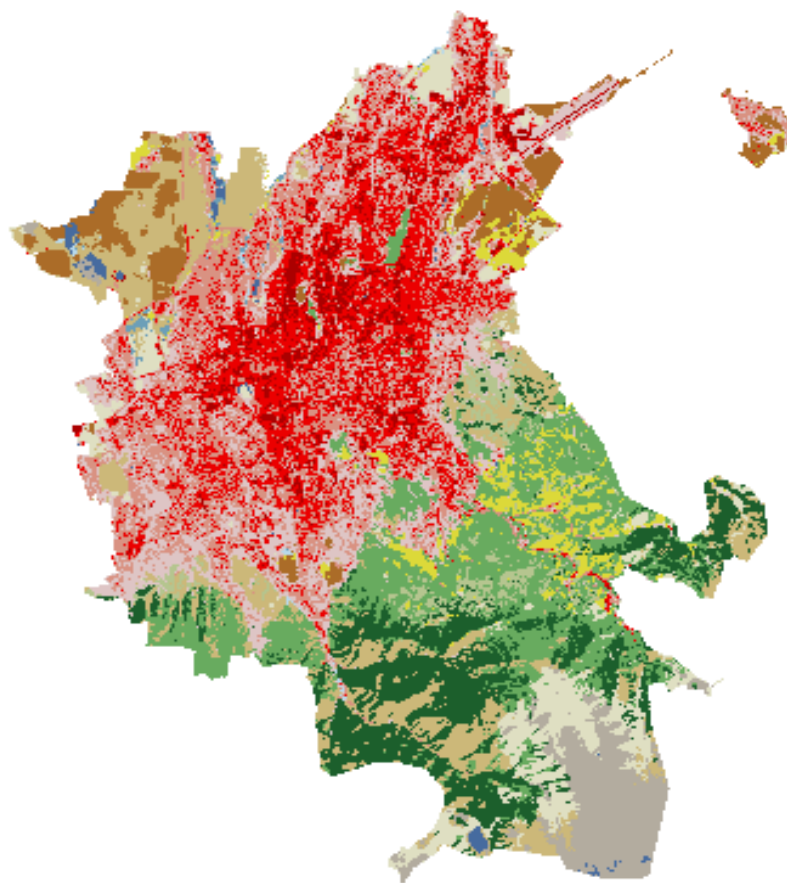


Рисунок 8 — Классифицированные растры за 2014 года

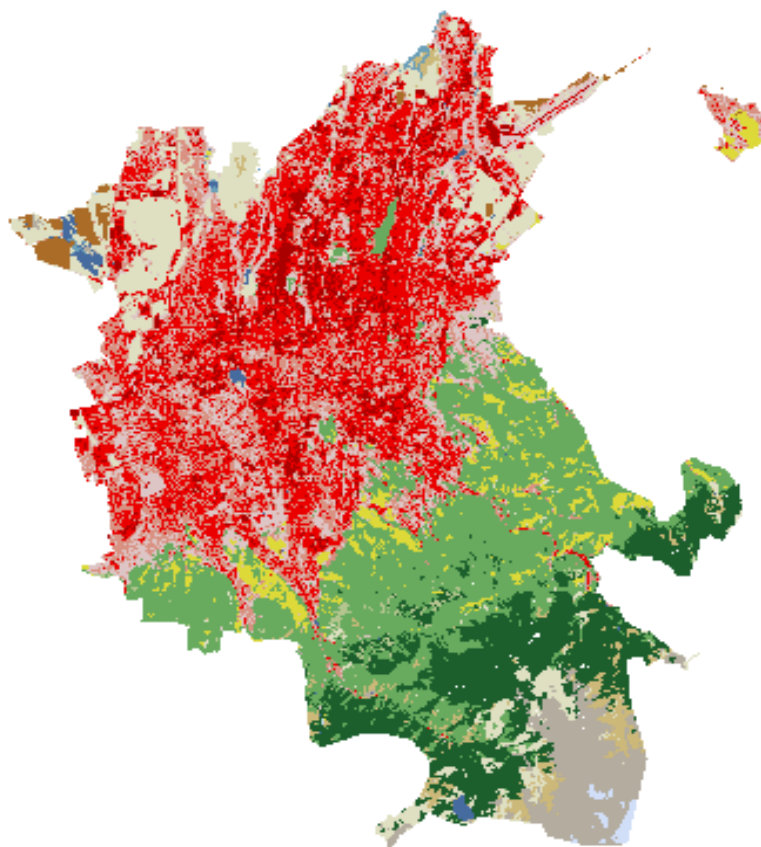


Рисунок 9 — Классифицированные растры за 2024 года

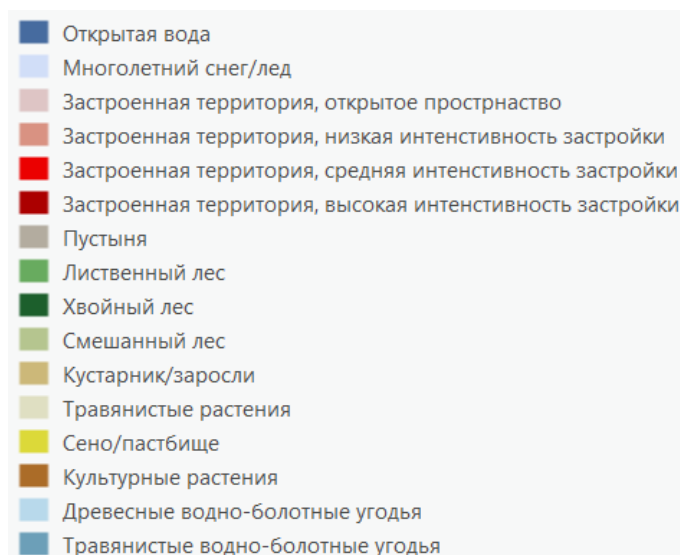


Рисунок 10 — Условное обозначение типов землепользования

Объединённое применение трёх подходов — индекса NDBI, пространственного анализа горячих точек и классификации на основе глубокого обучения — позволило всесторонне подойти к задаче оценки и картографирования урбанизированных территорий. Каждый из методов выявил

различные аспекты городской застройки, тем самым обеспечив многослойное понимание её структуры и динамики.

Использование спектрального индекса позволило оперативно выделить потенциально застроенные зоны, отражающие изменения в характеристиках поверхности. Анализ горячих точек дал возможность уточнить локализацию зон с высокой концентрацией зданий, то есть тех участков, где процессы уплотнения застройки происходят наиболее активно. Классификация земного покрова на основе моделей глубокого обучения обеспечила более полное тематическое картографирование, охватывающее не только застроенные участки, но и изменения в природной среде.

Сопоставление результатов трёх подходов подтвердило наличие общего тренда расширения урбанизированной территории, при этом каждый из методов зафиксировал его с разной степенью пространственной детализации. Это позволяет говорить о целесообразности комплексного использования всех трёх методов в городском анализе, особенно в задачах, связанных с мониторингом пространственного развития и планированием устойчивого градостроительства.

3. Влияние застройки и озеленения на температурный режим городской территории

3.1 Получение и анализ данных температуры поверхности (LST) на основе спутниковых наблюдений

Увеличение температуры в густозастроенных и малозелёных частях города — типичное проявление городского теплового эффекта. Здесь температура поверхности нередко выше, чем в районах с развитой растительностью, что объясняется сочетанием природных и техногенных факторов, влияющих на тепловой баланс городской среды: высокая теплоёмкость и теплоудержание строительных материалов (асфальт, бетон, кирпич); интенсивное поглощение солнечного излучения городскими поверхностями с низким альбедо; антропогенное тепловыделение от транспорта, отопления, кондиционирования и производственной деятельности; снижение скорости ветра и изменение естественной циркуляции воздуха вследствие плотной застройки; дефицит озеленения, снижающий эффект естественного охлаждения (эвотранспирации).

На основе данных спутника Landsat 8 для анализа была рассчитана температура поверхности земли (LST — Land Surface Temperature). Для обеспечения корректного сравнения данных о температуре в разные годы спутниковые снимки были отобраны исходя из метеорологических условий, для каждого периода выбраны даты с максимально сопоставимыми погодными характеристиками. Это позволило минимизировать влияние краткосрочных климатических флуктуаций на расчёт LST.

Для расчёта LST на основе спутниковых снимков Landsat была реализована автоматизированная модель в ModelBuilder в ArcGIS Pro (рис. 11). Такой подход позволил систематизировать процесс обработки изображений и избежать ручного выполнения повторяющихся операций для каждого набора данных.

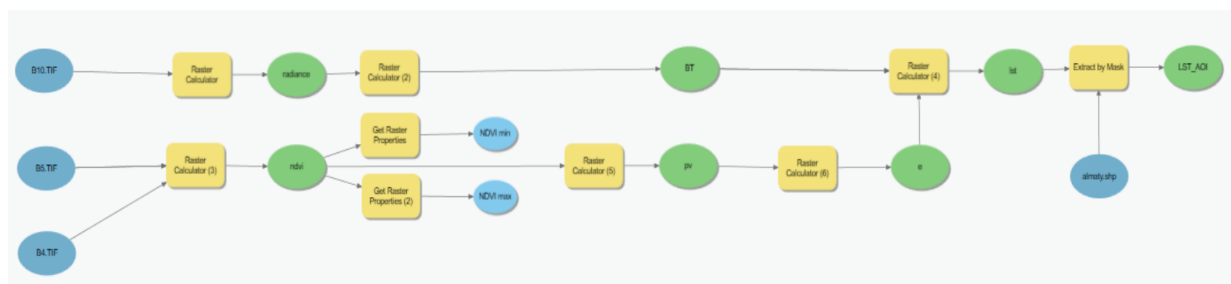


Рисунок 11 — Model builder

Процедура расчёта включала несколько последовательных этапов. На первом этапе производилось преобразование цифровых значений пикселей (DN) в радиационную яркость (TOA radiance) по формуле (2):

$$L = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (2)$$

где:

L — радиационная яркость,

M_L — коэффициент масштабирования (Radiance Mult),

Q_{CAL} — цифровое значение пикселя,

A_L — добавочный коэффициент (Radiance Add).

Параметры M_L и A_L извлекались из MTL-файла, прилагаемого к каждому снимку.

Далее выполнялось преобразование радиационной яркости в яркостную температуру по формуле (3):

$$T_b = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L} + 1\right)} \quad (3)$$

где:

T_b — яркостная температура в Кельвинах,

$K1, K2$ — калибровочные постоянные из метаданных,

L — радиационная яркость.

Следующим этапом являлась коррекция полученных температур с учётом эмиссивности поверхности — физического свойства различных типов покрова излучать тепло. Корректировка осуществлялась по формулам (4) и (5):

$$\varepsilon = 0.004 \times Pv + 0.986 \quad (4)$$

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (5)$$

где:

Pv — доля растительного покрова,

$NDVI_{min}$ и $NDVI_{max}$ — минимальные и максимальные значения $NDVI$,

ε — эмиссивность.

Расчёт температуры поверхности (LST) с учётом эмиссивности по формуле (6):

$$LST = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda \times T_b}{\rho} \right) \times \ln(\varepsilon)} \quad (6)$$

где:

$\lambda = 10.895$ мкм — длина волны,

$\rho = 1.438 \times 10^{-2}$ м·К — физическая постоянная,

ε — эмиссивность.

Затем растры с вычисленными температурными значениями были обрезаны по границе города Алматы с использованием инструмента Extract by Mask.

На полученных картах отчетливо прослеживается рост температуры в плотно застроенных районах. В то же время территории с высокой плотностью

растительности — парки, скверы, пригороды — демонстрируют заметно более низкие значения LST (рис.12).

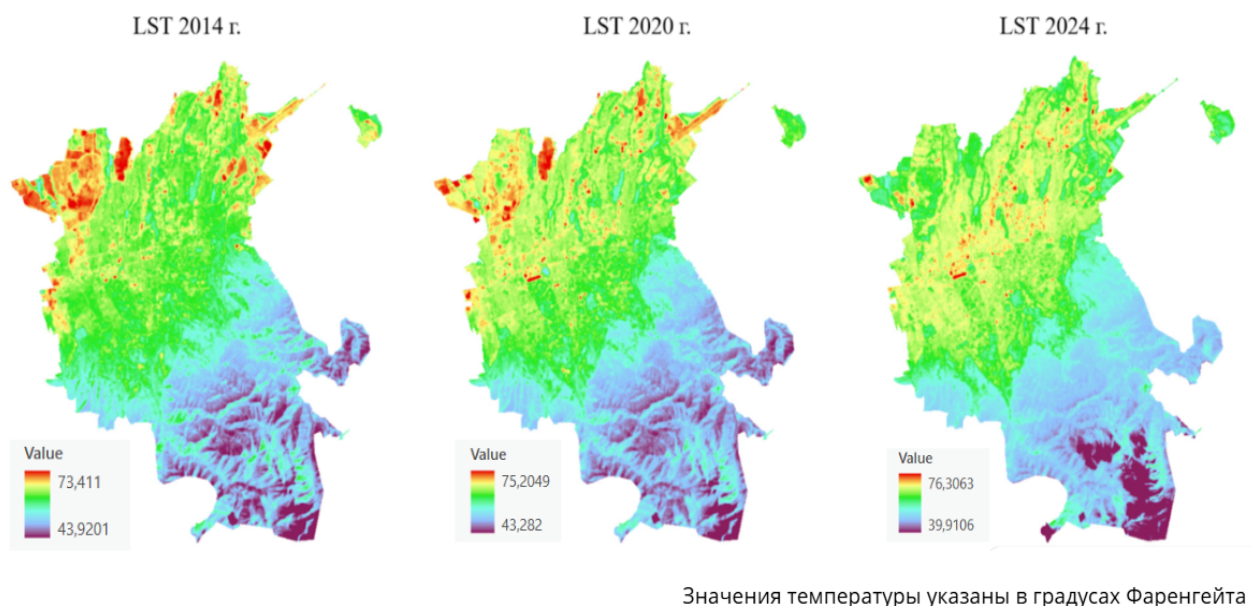


Рисунок 12 — Пространственное распределение LST за 2014, 2020 и 2024 года

Для пространственного анализа использовалась регулярная сетка из полигональных ячеек размером 300×300 метров, покрывающая территорию города. Инструментом Zonal Statistics as Table были получены средние значения температуры поверхности для каждого из двух временных срезов. Эти значения были присоединены к исходной сетке с использованием инструмента Join Field, благодаря чему каждая ячейка получила два температурных атрибута — за 2014 и 2024 годы. Далее при помощи Calculate Field было создано новое поле, в котором рассчитывалась разница между этими значениями. Результирующее поле отразило изменение температуры за рассматриваемый период на уровне каждой ячейки.

После расчета изменения температуры для каждой ячейки сетки, следующий этап включал подготовку данных для пространственного статистического анализа. Сначала сетка была обрезана по административной границе города с помощью Extract by Mask, чтобы исключить ячейки, выходящие за пределы исследуемой территории. Затем полигональная сетка была преобразована в точечный слой — центроиды ячеек — с использованием инструмента Feature to Point. Этот точечный слой с атрибутом изменения температуры был использован для выполнения анализа горячих точек (Hot Spot Analysis) (рис. 13).

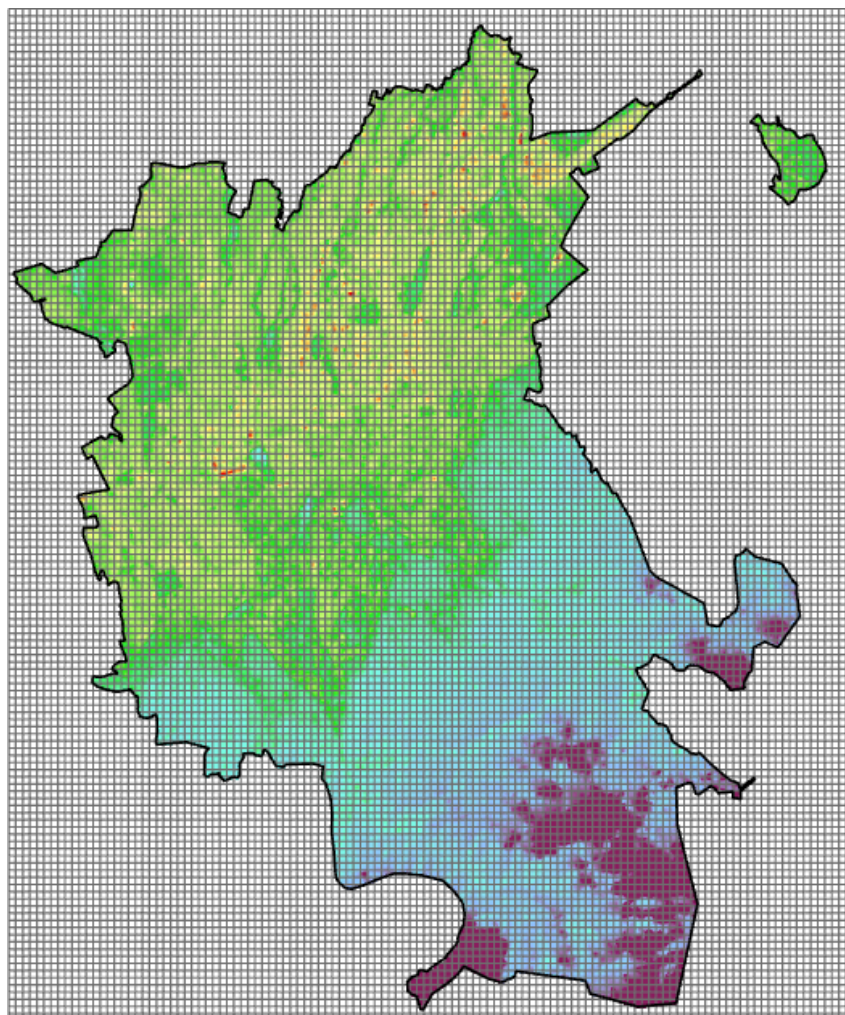


Рисунок 13 — Регулярная сетка на территории города Алматы

В результате использования инструмента Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi*) на основе изменений температуры поверхности (LST) за период 2014–2024 годов были выделены участки города Алматы, где зафиксированы статистически значимые изменения температуры (рис. 14). Метод Getis-Ord Gi* оценивает не только абсолютное значение изменения температуры в каждой точке, но и его пространственную взаимосвязь с соседними значениями. Такой подход позволяет выявить именно те области, где повышение или понижение температуры носит устойчивый и пространственно согласованный характер.

Карта, полученная по результатам анализа, показывает, как изменения температуры распределяются в пространстве. Участки, отмеченные как «Hot Spot» с уровнем доверия 90–99%, — это зоны, где температура заметно и статистически подтвержденно повысилась за последние десять лет. Области, обозначенные как «Cold Spot», наоборот, демонстрируют стабильное и значительное снижение температуры. Если повышение или понижение температуры происходит в одиночной ячейке и не совпадает с соседними значениями, такие изменения считаются незначимыми и не выделяются на карте.

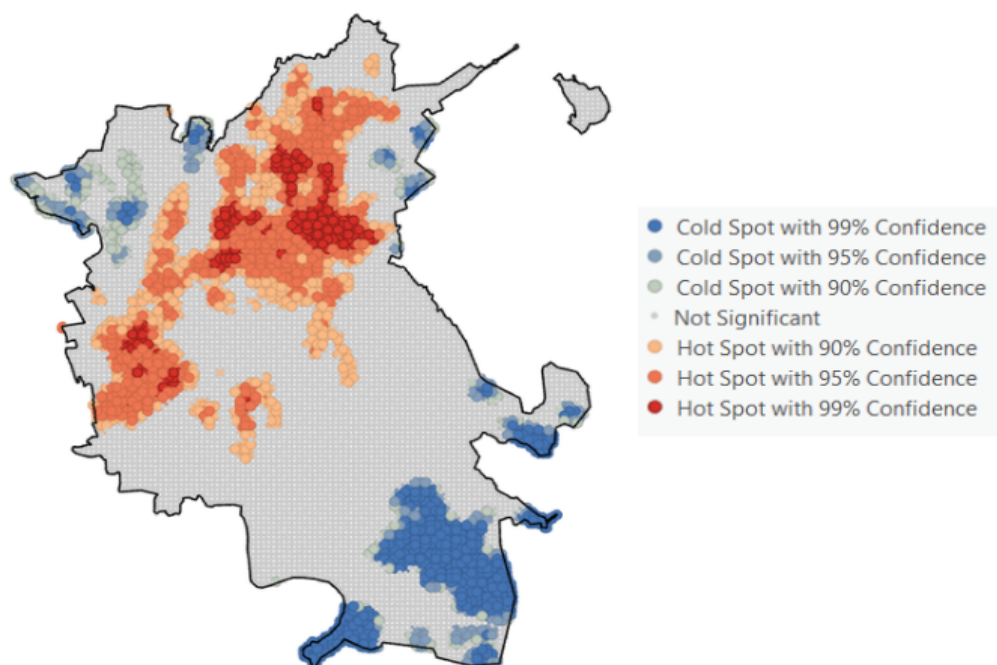


Рисунок 14 — Карта горячих точек по результатам выявленных температурных изменений

3.2. Пространственно-статистическое моделирование температуры с использованием регрессионного анализа

Для количественной оценки влияния урбанизационных факторов на пространственное распределение температуры поверхности был проведен регрессионный анализ методом обыкновенных наименьших квадратов (Ordinary Least Squares, OLS) в ArcGIS Pro. В качестве зависимой переменной использовались средние значения температуры поверхности (LST), рассчитанные ранее для каждой ячейки регулярной сетки. Независимыми переменными выступали два показателя: плотность застройки и доля растительности, выраженные в процентном соотношении соответствующей площади к площади каждой ячейки.

Доля застроенной территории получена по суммарной площади полигонов из векторного слоя зданий, загруженных из OpenStreetMap в пределах каждой ячейки. Все полигональные объекты зданий были приведены к той же системе координат, что и сетка, чтобы обеспечить точность геометрических операций. Далее, для того чтобы определить, какие части зданий попадают в ту или иную ячейку, был применён инструмент Intersect. Он позволил обрезать полигоны зданий по границам сетки и сформировать новый слой, где каждый объект представлял собой участок здания, попавший внутрь конкретной ячейки.

После получения пересечённых объектов была вычислена площадь каждого сегмента здания, попавшего в ячейку. Для этого с помощью

инструмента Calculate Geometry Attributes в поле площади было записано значение в квадратных метрах. На заключительном этапе с помощью инструмента Summary Statistics для каждой ячейки был подсчитан суммарный показатель площади всех построек. Затем этот показатель делился на площадь самой ячейки (в данном случае 90 000 м²), что позволило выразить плотность застройки как долю (или процент) от всей площади ячейки (рис.15).

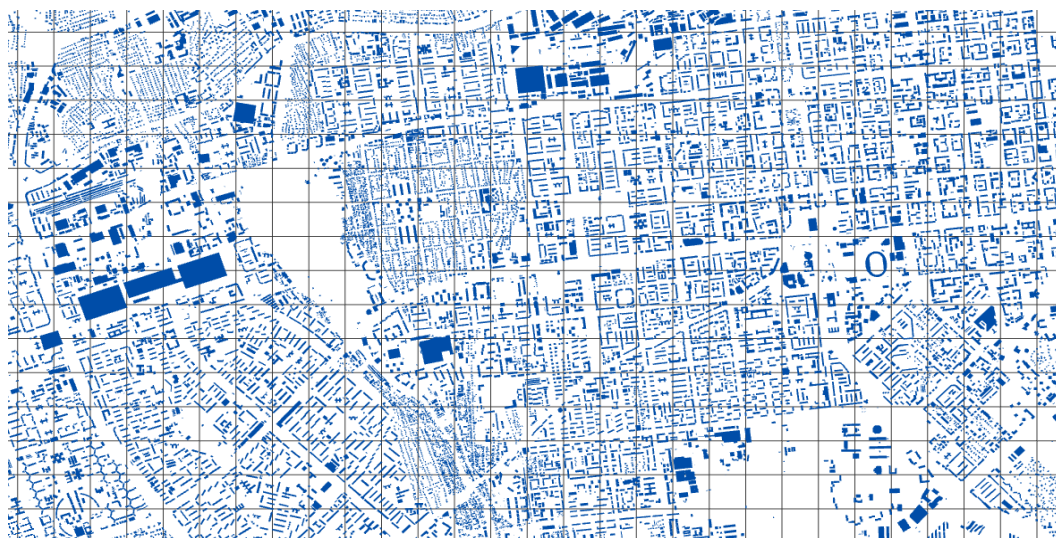


Рисунок 15 — Векторный слой зданий внутри регулярной сетки

Для оценки распределения растительности в городской среде был использован классифицированный растр ESA WorldCover. Этот набор данных представляет собой растровое покрытие с разрешением 10 метров, в котором каждая ячейка содержит информацию о типе поверхности — будь то застройка, растительность, вода, сельхозугодья и другие категории (рис. 16).

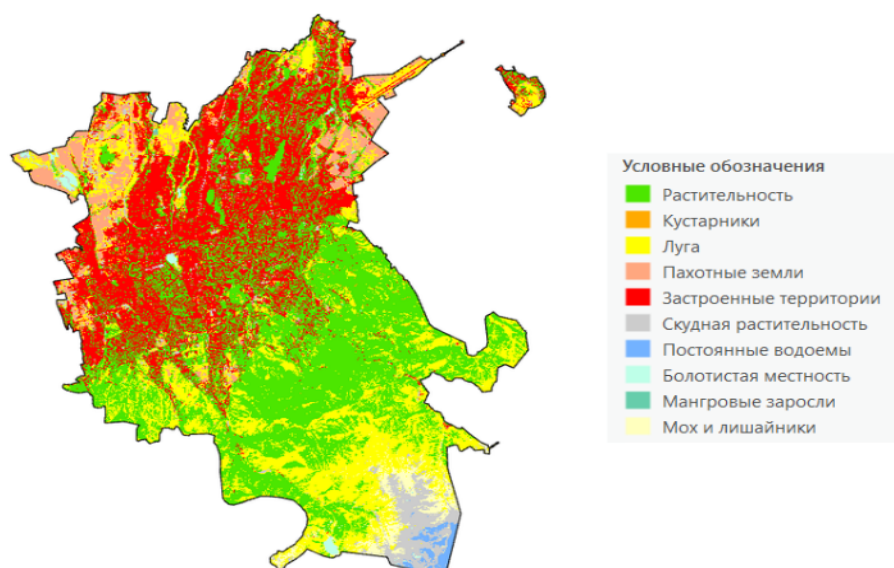


Рисунок 16 — Классифицированный растр ESA WorldCover

Из всего набора классов интерес представляли только участки, покрытые растительностью. С целью изолирования этих территорий был применён инструмент Reclassify: пикселям, соответствующим зелёным зонам, было присвоено значение «1», а остальным — «0». Полученный растр использовался для расчёта доли растительности в пределах каждой ячейки регулярной сетки. Инструмент Zonal Statistics as Table позволил определить среднее значение по каждому полигону, что в данном случае отражает процент покрытия зеленью (рис. 17).

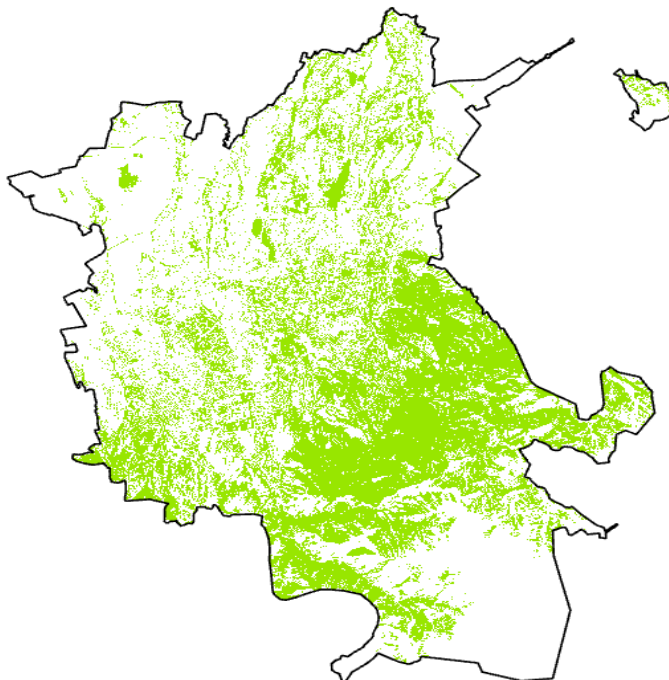


Рисунок 17 — Извлеченные зеленые насаждения

Аналогичным способом была получена температура поверхности — по растровому слою LST рассчитано среднее значение в пределах тех же ячеек.

После расчета необходимых входных данных уже был запущен инструмент Ordinary Least Squares. Согласно результатам модели, коэффициент при плотности застройки составил 0,4179. Это означает, что ее увеличение на 1 % приводит к среднему росту температуры поверхности примерно на 0,4179 °F. В переводе в градусы Цельсия это составляет около 0,232 °C. Напротив, коэффициент при плотности зеленых насаждений равен –0,0238, что интерпретируется как снижение температуры примерно на 0,0238 °F, или около –0,013 °C, при увеличении плотности древесного покрова на 1 %.

Коэффициенты обеих переменных статистически значимы ($p < 0.000001$), а значения t-статистики указывают на высокую уверенность модели в наличии зависимости. Это значит, что влияние плотности застройки и растительности на температуру поверхности практически невозможно объяснить случайностью. р-значение показывает вероятность того, что переменная вообще никак не влияет на результат — чем оно меньше, тем выше доверие к выводу о наличии

зависимости. t-статистика — это показатель надёжности оценки коэффициента: чем больше по модулю это значение, тем более уверенно можно считать, что переменная действительно влияет на зависимую. При этом значения VIF (Variance Inflation Factor) ниже 1,05, что означает отсутствие мультиколлинеарности — то есть независимые переменные не дублируют друг друга, и модель «понимает», какой именно фактор оказывает влияние.

Таблица 2 — Результаты регрессионного анализа

Summary of OLS Results - Model Variables								
Variable	Coefficient [a]	StdError	t-Statistic	Probability [b]	Robust_SE	Robust_t	Robust_Pr [b]	VIF [c]
Intercept	59,771291	0,077226	773,976039	0,000000*	0,122841	486,573968	0,000000*	-----
BUILD_DENSIT	0,417939	0,005358	78,001916	0,000000*	0,008231	50,776942	0,000000*	1,047243
TREE_COVER_D	-0,023750	0,001340	-17,728388	0,000000*	0,001503	-15,799449	0,000000*	1,047243

Значение коэффициента детерминации (R^2) составило 0,469, что свидетельствует о том, что около 47 % вариации температуры поверхности объясняется включенными в модель переменными — плотностью застройки и плотностью древесного покрова. Такое значение R^2 указывает на умеренную, но значимую степень объясняющей способности модели в контексте комплексных факторов городской среды.

Совокупная значимость модели подтверждается высокими значениями F-статистики (3658,03) и Wald-статистики (5806,29) с соответствующими p-значениями ниже 0,000001. Это означает, что модель в целом является статистически значимой. Однако следует обратить внимание на значения статистики Кёнкера (Koenker BP) и Джарка-Бера (Jarque-Bera), которые также оказались значимыми ($p < 0,000001$). Статистика Кёнкера показывает, что остатки модели имеют неоднородную дисперсию (гетероскедастичность), а статистика Джарка-Бера указывает на отклонение распределения остатков от нормального. Это снижает точность обычных p-оценок. В связи с этим интерпретация значимости коэффициентов основывалась на устойчивых (robust) p-значениях, представленных в отчете.

Таблица 2.1 — Результаты регрессионного анализа

OLS Diagnostics			
Input Features	fishnet_clipped_almaty	Dependent Variable	LST_MEAN
Number of Observations	8273	Akaike's Information Criterion (AICc)['d']	46052,828166
Multiple R-Squared['d']	0,469397	Adjusted R-Squared['d']	0,469269
Joint F-Statistic['e']	3658,026560	Prob(>F), (2,8270) degrees of freedom	0,000000*
Joint Wald Statistic['e']	5806,287435	Prob(>chi-squared), (2) degrees of freedom	0,000000*
Koenker (BP) Statistic['f']	905,799916	Prob(>chi-squared), (2) degrees of freedom	0,000000*
Jarque-Bera Statistic['g']	8133,996692	Prob(>chi-squared), (2) degrees of freedom	0,000000*

Визуальный анализ распределения переменных и их связи с температурой поверхности был выполнен с помощью гистограмм и диаграмм рассеяния, сгенерированных в отчёте по результатам OLS-модели.

Гистограммы демонстрируют, как распределены значения каждой из переменных по всем ячейкам сетки. Плотность застройки и плотность древесной растительности имеют выражено асимметричное распределение: в большинстве ячеек наблюдаются низкие значения, а высокие встречаются гораздо реже. Это отражает реальную пространственную структуру города, где преобладают малоэтажные или незастроенные участки, а плотно застроенные зоны и массивные зелёные насаждения занимают меньшую долю. Температура поверхности (LST) имеет более сбалансированное распределение, с явным смещением в сторону высоких значений, что указывает на преобладание тёплых участков в пределах городской черты (рис. 18).

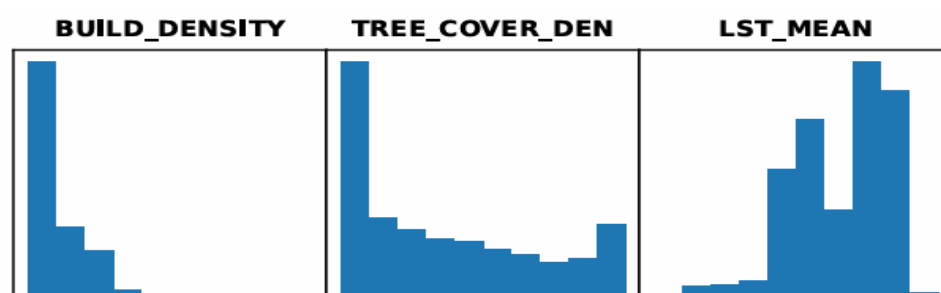


Рисунок 18 — Гистограмма распределения переменных по ячейкам сетки

Диаграммы рассеяния позволяют оценить форму и направление связи между объясняющими переменными и температурой поверхности. График между плотностью застройки и LST показывает положительную тенденцию — при увеличении плотности застройки температура, как правило, возрастает. В случае древесного покрова наблюдается обратная зависимость: более высокая доля озеленения соответствует более низким температурам. Оба графика подтверждают наличие линейной связи, что соответствует значениям коэффициентов в модели и подтверждает корректность её структуры (рис. 19).

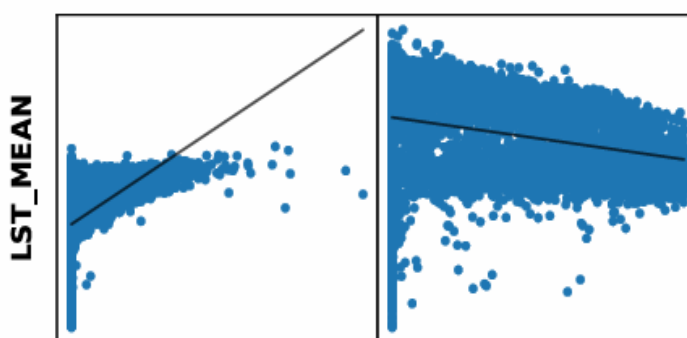


Рисунок 19 — Диаграммы рассеяния определяющие направление связи между переменными

На завершающем этапе регрессионного анализа была выполнена проверка распределения остатков модели. Для этого была построена гистограмма стандартизованных остатков, на которую наложена теоретическая кривая нормального распределения. Идеально, если распределение остатков соответствует нормальному, что свидетельствует об отсутствии систематических ошибок в модели.

Анализ полученной гистограммы показал, что остатки распределены несимметрично и несколько отклоняются от нормального распределения. Наблюдается смещение распределения влево, а также значительная концентрация значений вблизи нуля, что подтверждает результаты статистики Джарка-Бера, ранее зафиксированной в отчёте. Такое поведение остатков указывает на возможные искажения — например, пропущенные переменные, нелинейные взаимосвязи или пространственную неоднородность.

Местами модель демонстрирует систематические отклонения в предсказаниях: переоценка температуры может наблюдаться на участках с открытым грунтом и минимальным озеленением, таких как пустыри или строительные площадки, где воздействие солнечной радиации высоко, но плотность застройки отсутствует. Аналогично, возможна недооценка температуры вблизи водоёмов, которые оказывают локальное охлаждающее влияние, однако этот фактор не был включён в модель. Такие участки оказываются вне рамок объяснительной способности модели, что дополнительно подчёркивает необходимость более гибких аналитических подходов, учитывающих локальные особенности ландшафта и землепользования (рис. 20).

Histogram of Standardized Residuals

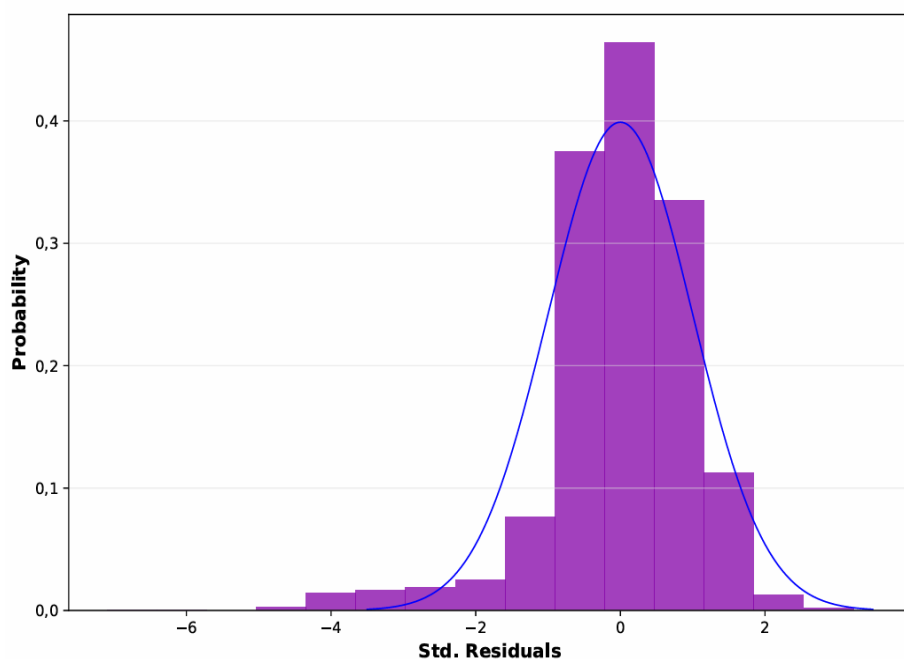


Рисунок 20 — Гистограмма стандартизованных остатков

По результатам анализа была создана карта стандартизированных остатков (StdResid), которые представляют собой разницу между фактическими значениями температуры и значениями, предсказанными моделью. Цвета на карте показывают, насколько сильно предсказания модели отклоняются от фактических значений температуры. Бледно-жёлтые ячейки обозначают минимальные отклонения, где модель предсказала температуру точно. Синие оттенки указывают на переоценку — температура оказалась ниже, чем предсказано. Красные и оранжевые — на недооценку, где фактические значения были выше прогноза (рис. 21).

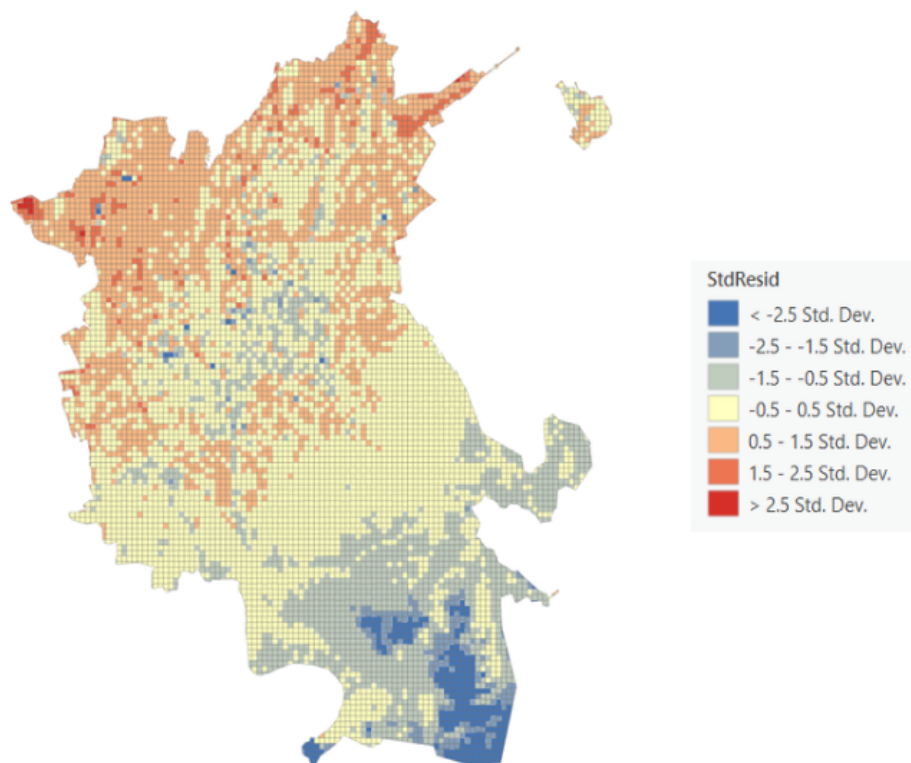


Рисунок 21 — Карта стандартизированных остатков

Несмотря на указанные отклонения, результаты модели можно считать статистически достоверными. Высокие значения t -статистик, значимость коэффициентов и отсутствие мультиколлинеарности свидетельствуют о том, что выявленные зависимости между переменными устойчивы и интерпретируемы. Модель успешно отражает общую тенденцию повышения температуры в более плотно застроенных и менее озелененных районах. Следовательно, полученные результаты можно использовать для оценки вкладов факторов в формирование температурного режима городской среды, однако при этом необходимо учитывать ограничения и потенциальные источники смещения, выявленные при анализе остатков.

3.3. Оценка теплового риска на основе индекса Heat Risk Index (HRI)

Индекс теплового риска (Heat Risk Index, HRI) используется для комплексной оценки уязвимости территорий к воздействию экстремальных температур в городской среде. В отличие от анализа температуры как изолированного показателя, HRI учитывает сразу несколько факторов, которые усиливают или смягчают воздействие жары на население. Этот индекс позволяет выделить участки, где сочетание высокой температуры, плотной застройки и социальной уязвимости населения создаёт наибольшую угрозу для здоровья и качества жизни.

Для расчёта индекса HRI в ArcGIS Pro была реализована последовательная процедура, основанная на открытых методических материалах ESRI, с учётом адаптаций под конкретные условия города Алматы. Индекс формировался на основе трёх компонентов: температура поверхности (LST), плотность зеленых насаждений и плотность населения, которая отражает степень уязвимости: чем больше людей проживает на ограниченной территории, тем выше потенциальный риск негативного воздействия жары, особенно для уязвимых групп. Для интеграции плотности населения с данными регулярной сетки мы использовали административное деление города Алматы и сведения о численности населения. На первом этапе сетка с размером ячеек 300×300 м была разрезана по границам районов с помощью инструмента *Clip*. После этого каждому фрагменту сетки, попавшему в тот или иной район, было присвоено значение плотности населения этого района. Для обеспечения сопоставимости разных показателей, все входные данные были предварительно стандартизированы с помощью инструмента *Standardize Field* по методу *Minimum-Maximum*, чтобы привести их к единому диапазону значений от 1 до 5. Это было выполнено для того, чтобы привести все значения к единой шкале и исключить влияние различий в единицах измерения, что позволило корректно сравнивать вклад каждой независимой переменной в изменение температуры поверхности.

После стандартизации всех трёх компонентов для каждой ячейки был рассчитан итоговый индекс HRI. Итоговая формула представляла собой простое суммирование значений всех стандартных компонентов (LST, плотность населения, дефицит зелени), что позволило получить интегральную оценку уровня теплового риска. Чем выше итоговое значение, тем выше совокупная уязвимость данной территории.

Полученная карта HRI позволила визуально выделить районы с наибольшим уровнем риска, где сочетаются факторы высокой температуры поверхности, плотной застройки, низкой доли растительности и значительной численности населения (рис. 22).

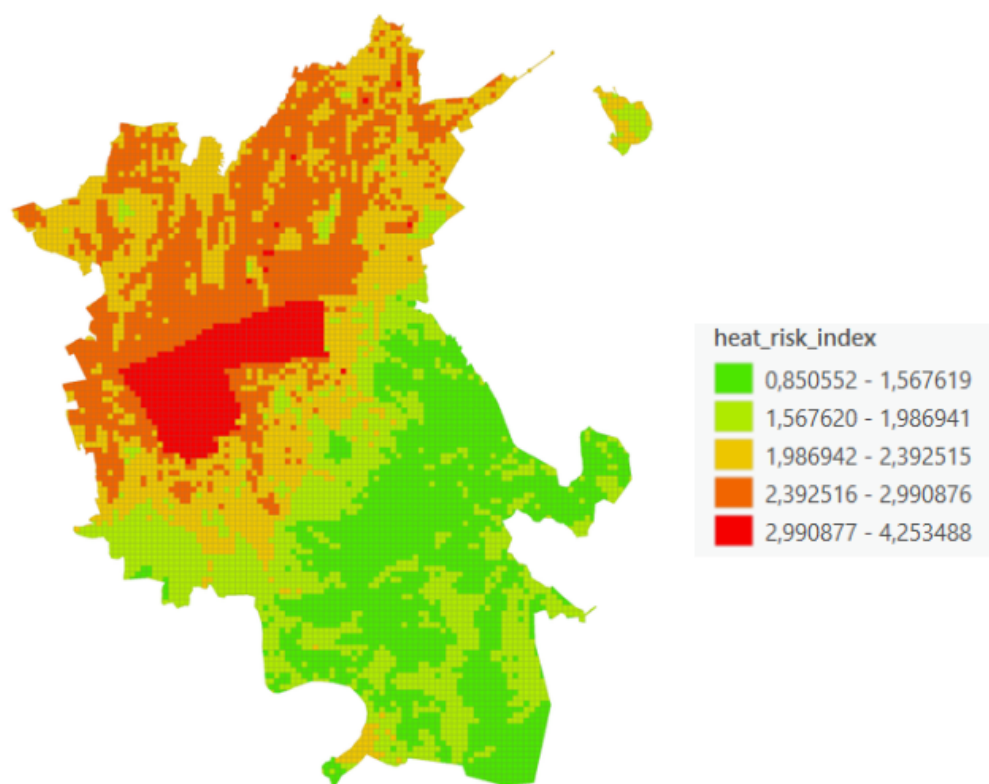


Рисунок 22 — Карта индекса теплового риска

4. Геоинформационное моделирование шумового загрязнения в городской территории

4.1 Пространственное моделирование уровня шумового загрязнения на основе данных OpenStreetMap и инструментов ArcGIS Pro

Шумовое загрязнение — это тип экологического загрязнения, связанный с избыточным уровнем звука в окружающей среде, который может негативно влиять на здоровье человека, животных и общее качество жизни. Основными источниками шума в городах являются транспорт (автомобили, поезда, самолеты), промышленное производство, строительные работы, а также высокая плотность населения и активная городская инфраструктура.

В отличие от других видов загрязнения, шум не накапливается в окружающей среде, но его воздействие может быть постоянным и разрушительным. Повышенные уровни шума вызывают у людей стресс, раздражительность, нарушения сна, снижение работоспособности и даже проблемы с сердечно-сосудистой системой при длительном воздействии. Кроме того, шум негативно влияет на животных, нарушая их поведение, коммуникацию и миграционные процессы.

В рамках настоящего исследования произведён расчёт эквивалентного уровня шума (L_{Aeq}) в городской среде на основе данных OpenStreetMap (OSM), без использования приборов прямого измерения. Методика основана на пространственном анализе расположения зданий и дорог, а также на учёте характеристик дорожного движения и типов покрытия. Для анализа были скачаны слои дорог и зданий с OpenStreetMap (рис. 23–26), а также применялась геоинформационная система ArcGIS с использованием инструментов пространственного анализа и Python-скриптов.



Рисунок 23 — Слой со зданиями города Алматы



Рисунок 24 — Слой со зданиями города Алматы



Рисунок 25 — Слой с дорогами города Алматы



Рисунок 26 — Слой с дорогами города Алматы

Для определения эквивалентного уровня шума использовалась следующая формула (7):

$$LA_{eq} = E + C_{reflectie} - D_{afstand} - D_{bodem} \quad (7);$$

Где:

LA_{eq} – эквивалентный уровень шума;

E – базовый уровень шума от источника;

$C_{reflectie}$ – отражение шума от зданий и других объектов;

$D_{afstand}$ – затухание шума с расстоянием;

D_{bodem} – поглощение шума поверхностью земли;

Для расчёта базового уровня шума от дороги использовалась формула (8):

$$E = 10 \cdot \log_{10}(Q) + 40 + 10 \cdot \log_{10}(V / 70) \quad (8);$$

Где:

Q — интенсивность движения (ADT) в автомобилях в час (или в сутки, если ADT);

V — средняя скорость (км/ч);

Для этого мы добавили поля в атрибутивную таблицу дорог:

ADT_Est_N — среднесуточный поток;

Maxspeed — средняя скорость;
 Далее был вычислен базовый уровень шума от источника Е с помощью поля Calculate Field (Python выражение) (рис. 27):

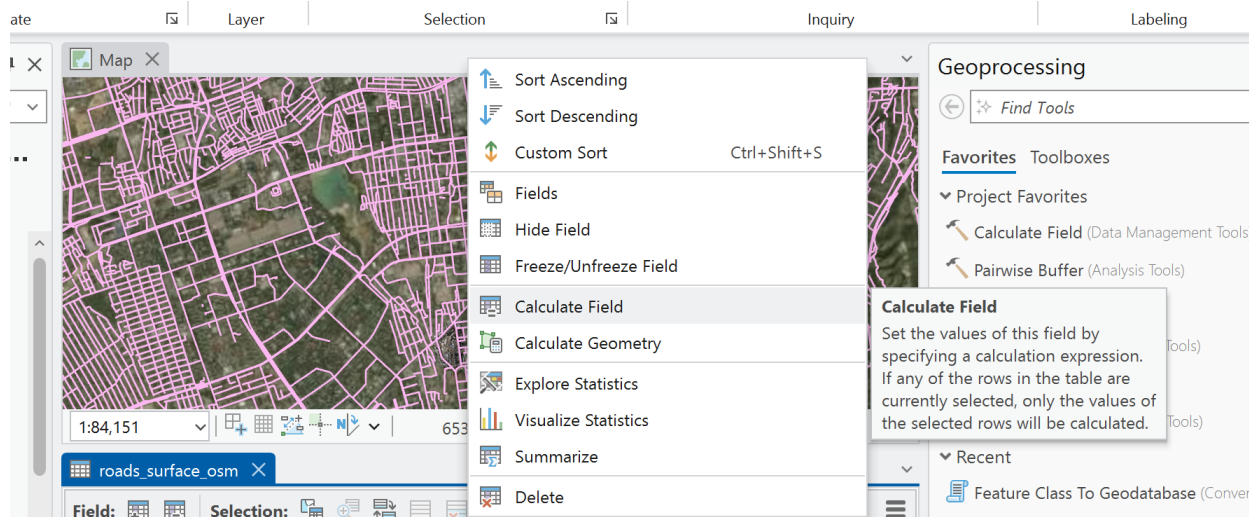


Рисунок 27 — Инструмент калькулятор полей

$10 * \text{math.log10}(!\text{ADT_Est_N}!) + 40 + 10 * \text{math.log10}(!\text{maxspeed}! / 70);$

Если здания расположены ближе 15 м по обе стороны дороги, добавляется поправка на отражения $C_{\text{reflectie}} = 2$ дБ. Для этого использовался следующий алгоритм: расчёт расстояний от зданий до дорог с помощью инструмента *Near*, определение зданий по обе стороны дороги на расстоянии до 15 м;

Для вычисления количества зданий у каждой дороги, был написан код в окне Python, который выглядит следующим образом (рис. 28):

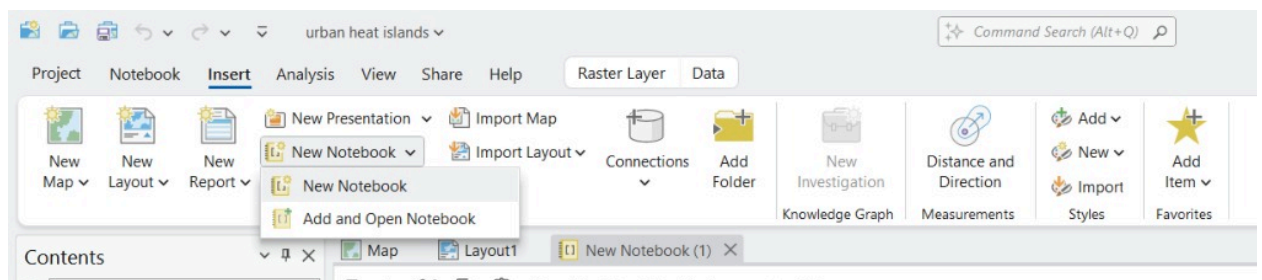


Рисунок 28 — Панель инструментов

```
import arcpy
import math
```

```
# Входные данные
roads = "roads_surface_osm"
buildings = "building_levels"
search_distance = 15 # метров
```



```

# Добавим поле, если нужно
field_name = "both_sides"
if field_name not in [f.name for f in arcpy.ListFields(roads)]:
    arcpy.AddField_management(roads, field_name, "SHORT")

# Функция для расчета направления между двумя точками
def calculate_angle(p1, p2):
    angle = math.degrees(math.atan2(p2.X - p1.X, p2.Y - p1.Y))
    return (angle + 360) % 360 # Приводим к 0-360

with arcpy.da.UpdateCursor(roads, ["OID@", "SHAPE@", field_name]) as
road_cursor:
    for row in road_cursor:
        road_geom = row[1]
        midpoint = road_geom.positionAlongLine(0.5, True).firstPoint

        angles = []

        # Поиск зданий в радиусе
        arcpy.MakeFeatureLayer_management(buildings, "temp_buildings")
        arcpy.SelectLayerByLocation_management("temp_buildings",
        "WITHIN_A_DISTANCE", road_geom, f"{search_distance} Meters")

        with arcpy.da.SearchCursor("temp_buildings", ["SHAPE@"]) as b_cursor:
            for b_row in b_cursor:
                b_geom = b_row[0]
                nearest = b_geom.labelPoint
                angle = calculate_angle(midpoint, nearest)
                angles.append(angle)

        # Считаем, есть ли здания по обе стороны
        sides = set()
        for angle in angles:
            if 45 < angle < 135:
                sides.add("right")
            elif 225 < angle < 315:
                sides.add("left")

        row[2] = 1 if len(sides) >= 2 else 0
        road_cursor.updateRow(row)

arcpy.Delete_management("temp_buildings")

```

После этого были отобраны участки дорог, находящиеся ближе 15 метров к зданиям, расположенным по обе стороны. Для них была применена поправка на отражение в размере 2 дБ.

Ослабление шума с расстоянием (Dafstand) рассчитывалось по формуле:

$$\text{Dafstand} = 20 \cdot \log_{10}(R / 10),$$

где R — расстояние от дороги до ближайшего здания. Эти расстояния были получены с помощью инструмента Near. Все вычисления выполнялись с использованием функции Field Calculator в ArcGIS Pro.

```
calc(!R!)
import math
def calc(R):
    try:
        if R is not None and R > 0:
            return 20 * math.log10(max(R, 0.1)) # не меньше 0.1 м
        else:
            return 20 # безопасный минимальный уровень
    except:
        return 2
```

Итоговый слой уровня шума визуализировался в виде тепловой карты на основе суммарного значения LAeq. Для этого применялись стандартные инструменты визуализации ArcGIS (рис. 29–30).

	H_Tra	Avg_H_Traf	E	Dafstand	R	Creflectie	Dbodem	LAeq
1	4687.5	3125	89.3305	0	0.532046	0	0	89.330498
2	4687.5	3125	89.3305	0	0.596157	0	0	89.330498
3	4687.5	3125	89.3305	0	0.596157	0	0	89.330498
4	4687.5	3125	89.3305	0	0.596157	0	0	89.330498
5	0	1937.5	87.2544	0	0.620309	2	0	89.254402
6	0	1937.5	87.2544	0	0.620309	2	0	89.254402
7	0	1937.5	87.2544	0	0.620309	2	0	89.254402
8	0	1937.5	87.2544	0	0.620309	2	0	89.254402
9	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402
10	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402
11	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402
12	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402
13	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402
14	0	1958.33	86.0515	0	0.621695	2	0	88.051498
15	0	1958.33	86.0515	0	0.621695	2	0	88.051498

Рисунок 29 — Атрибутивная таблица с результатами вычисления

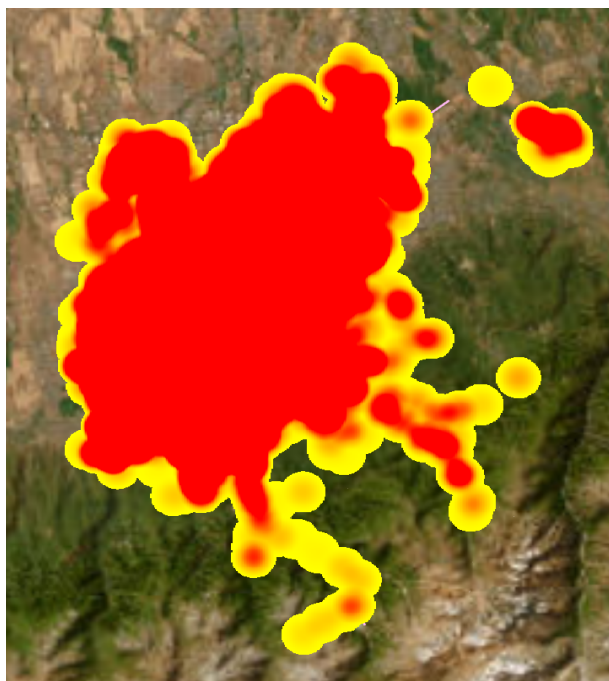


Рисунок 30 — Hot spot шумового загрязнения

По результатам геоинформационного моделирования уровней шумового загрязнения были выявлены участки с наибольшей акустической нагрузкой. Наиболее высокие значения эквивалентного уровня шума (L_{Aeq}) зафиксированы вдоль крупных магистралей города. Три наиболее шумных улицы — проспект Саина (89,3 дБ), проспект Аль-Фараби (89,25 дБ) и улица Дулати (88,05 дБ) (рис.31).

roads_surface_osm													
Field: Add Calculate Selection: Select By Attributes Zoom To Switch Clear Delete Copy													
	H_Tra	Avg_H_Traf	E	Dafstand	R	Creflectie	Dbodem	L _{Aeq}	OBJECTID *	TARGET_FID	FREQUENCY	SUM_Join_Count	count_buil
1	4687.5	3125	89.3305	0	0.532046	0	0	89.330498	27170	27170	1	0	0
2	4687.5	3125	89.3305	0	0.596157	0	0	89.330498	37796	37796	1	16	0
3	4687.5	3125	89.3305	0	0.596157	0	0	89.330498	37797	37797	1	7	0
4	4687.5	3125	89.3305	0	0.596157	0	0	89.330498	37798	37798	1	7	0
5	0	1937.5	87.2544	0	0.620309	2	0	89.254402	42789	42789	1	0	0
6	0	1937.5	87.2544	0	0.620309	2	0	89.254402	42790	42790	1	0	0
7	0	1937.5	87.2544	0	0.620309	2	0	89.254402	42791	42791	1	0	0
8	0	1937.5	87.2544	0	0.620309	2	0	89.254402	42792	42792	1	0	0
9	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402	42793	42793	1	0	0
10	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402	42794	42794	1	0	0
11	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402	42795	42795	1	0	0
12	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402	42796	42796	1	0	0
13	0	1937.5	87.2544	0	0.400154	2	0	89.254402	42797	42797	1	0	0
14	0	1958.33	86.0515	0	0.621695	2	0	88.051498	39590	39590	1	44	0
15	0	1958.33	86.0515	0	0.621695	2	0	88.051498	39592	39592	1	44	0

Рисунок 31 — Значения уровня шума в атрибутивной таблице

Высокие показатели обусловлены интенсивным автомобильным трафиком, высокой скоростью движения и плотной застройкой, способствующей отражению звуковых волн. Эти участки требуют особого внимания в контексте планирования мер по снижению шумового воздействия на окружающую среду.

4.2 Обработка данных аэрофотосъемки

Обработка аэрофотоснимков в ПО Agisoft Metashape для создания ортофотоплана и цифровой модели рельефа (ЦМР) на основе данных, полученных с беспилотного летательного аппарата, начинается с загрузки аэрофотоснимков в программу через команду «Добавить снимки». (рис. 32) Для успешной обработки снимки должны быть выполнены с соблюдением требований к перекрытию: 60–80% бокового и 80–90% продольного перекрытия.

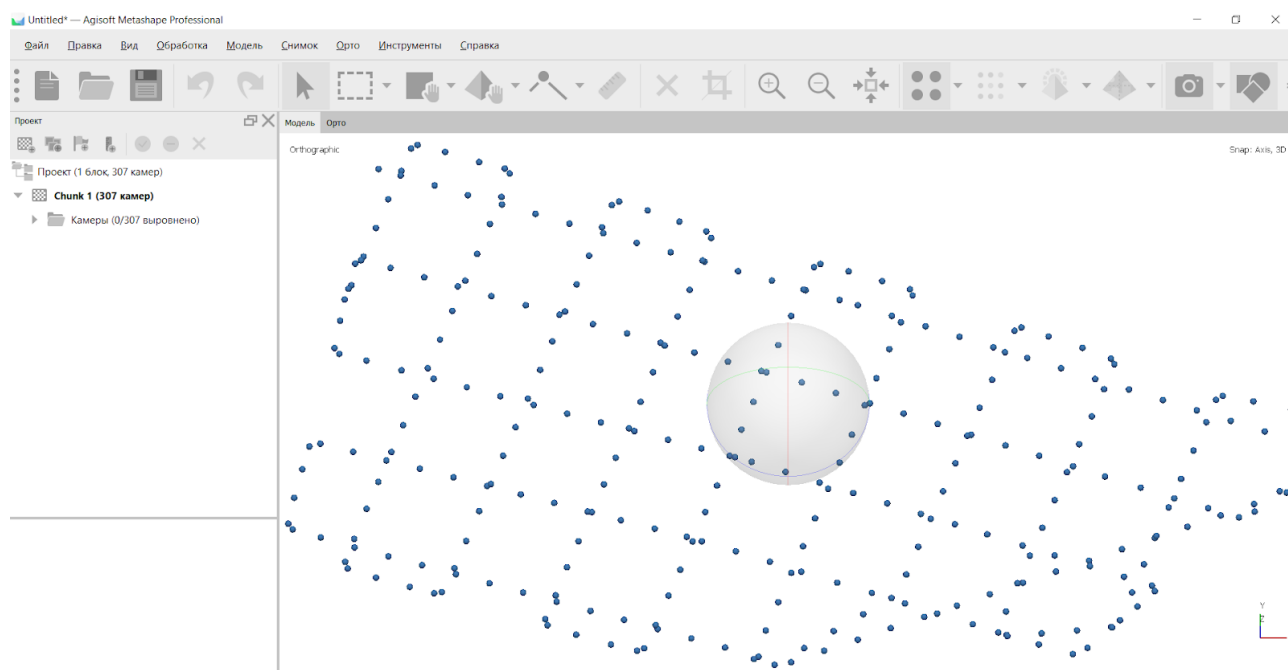


Рисунок 32 — Загруженные аэрофотоснимки

Далее выполняется выравнивание фотографий через команду «Выровнять снимки» в меню «Обработка». (рис. 33) Этот этап запускает процесс фототриангуляции, при котором программа определяет положение и ориентацию камеры для каждого снимка, находя связующие точки на изображениях.

В настройках выравнивания рекомендуется установить среднюю или высокую точность в зависимости от требований к детализации, включить предварительный отбор парного соответствия для ускорения обработки и задать лимиты ключевых точек (например, 40 000) и связующих точек (например, 4 000), чтобы исключить ненадёжные совпадения.

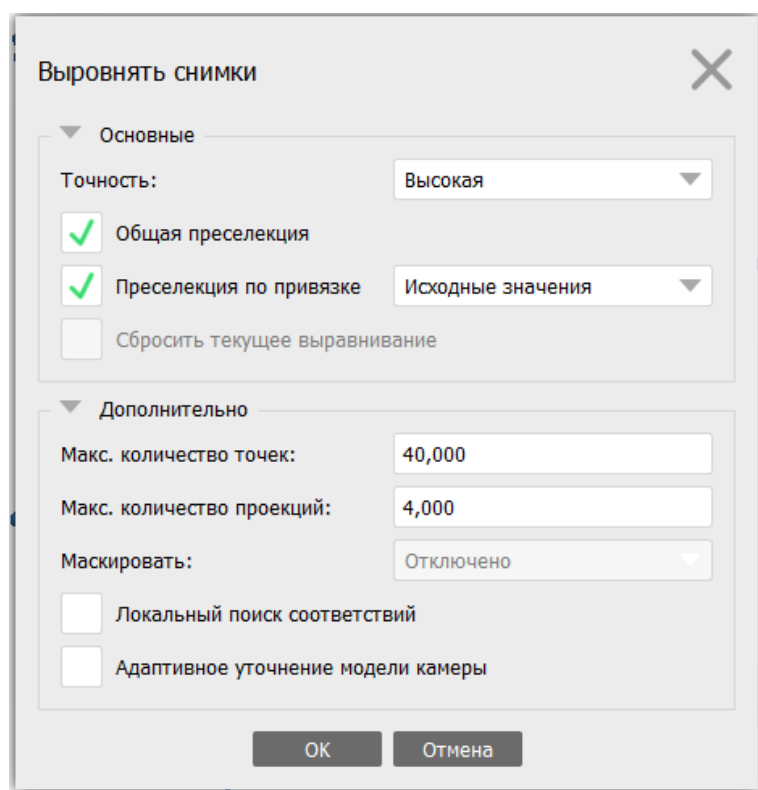


Рисунок 33 — Меню инструмента “Выровнять снимки”

Результатом является разреженное облако точек, представляющее собой трёхмерную модель на основе совпадающих точек. (рис. 34) Разреженное облако проверяется на наличие некорректно выровненных снимков, которые при необходимости удаляются.

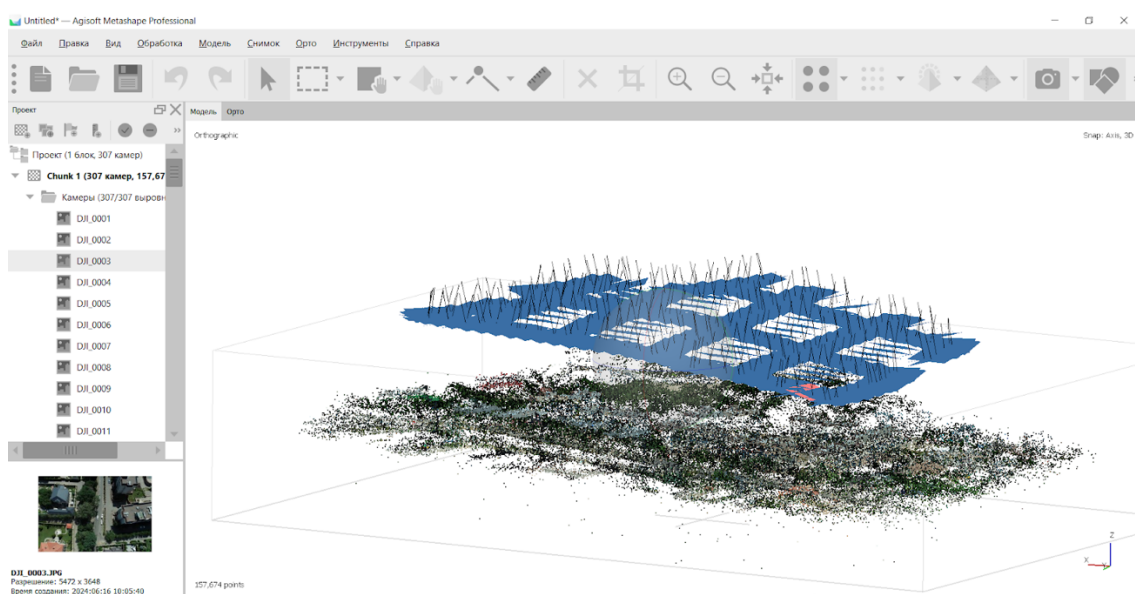


Рисунок 34 — Результаты первого шага обработки, отображаемые в окне Модель

Для геопривязки в программу импортируются наземные контрольные точки (GCP) с известными координатами, полученными с помощью GPS. Эти точки размещаются вручную на снимках, идентифицируясь минимум на двух изображениях, или автоматически, если они заранее отмечены. После размещения контрольных точек выполняется оптимизация параметров камер через команду «Оптимизировать камеры», которая корректирует координаты точек и параметры камер, минимизируя сумму ошибок репроекции и несовпадения с координатами контрольных точек. Этот шаг повышает точность модели.

Следующий этап заключается в построении плотного облака точек с помощью команды «Построить плотное облако». Настройки включают выбор качества (высокое или среднее, в зависимости от объёма данных и требований к детализации) и фильтрацию глубины (агрессивную для устранения шума в городских сценах или мягкую для более гладких поверхностей). Плотное облако точек представляет собой детализированную трёхмерную модель, которая отражает геометрию местности, включая здания и рельеф (рис. 35).

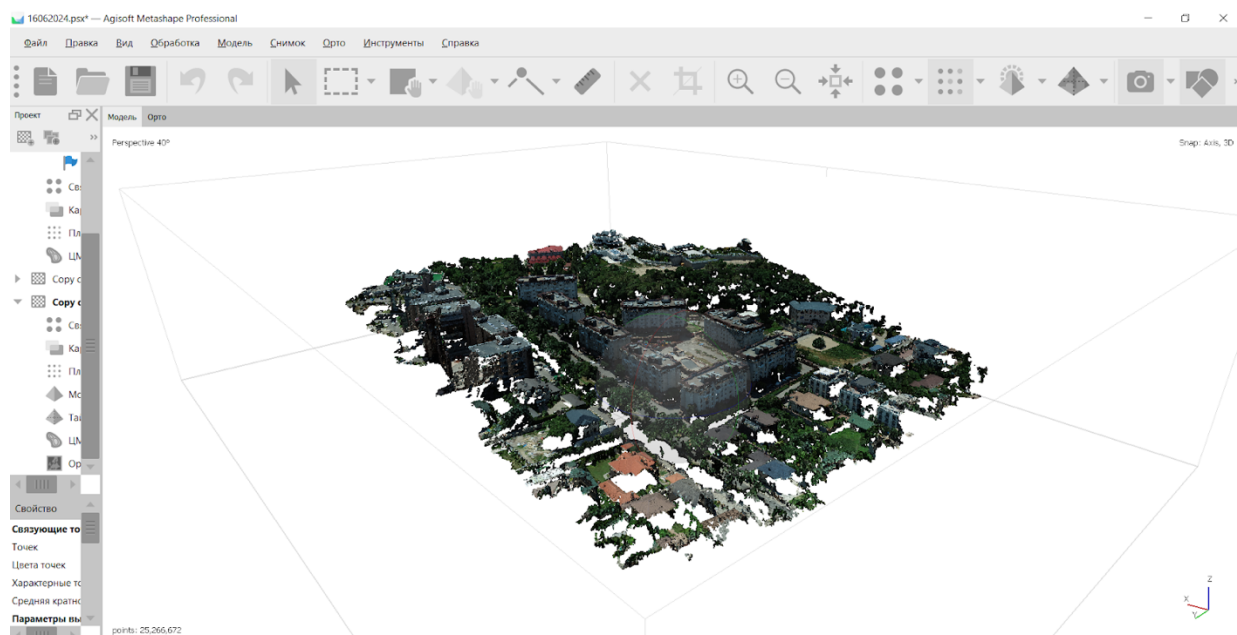


Рисунок 35 — Плотное облако точек

После создания плотного облака точек в программном обеспечении Agisoft Metashape следующим этапом является построение трехмерной модели (модели поверхности) для визуализации жилого комплекса «Ак Бота». Для этого в интерфейсе программы выбирается команда «Построить модель», где в качестве источника данных указывается плотное облако точек. В параметрах также задаются тип поверхности и желаемое качество модели, что влияет на детализацию результирующей сетки. В результате программа генерирует полигональную 3D-модель, представляющую собой треугольную сетку, описывающую форму объектов местности (рис. 36).



Рисунок 36 — 3D модель местности

Затем создаётся цифровая модель местности (рис. 37) с помощью команды «Построить ЦММ», где задаются параметры. Заключительным этапом является создание ортофотоплана (рис. 38). В меню "Обработка" выбирается пункт "Построить ортофотоплан", представляющий собой геопривязанное изображение территории без искажений, вызванных рельефом или углом съемки. Полученный ортофотоплан служит основой для дальнейшего моделирования шума в городской среде.

ЦМР и ортофотоплан можно экспортировать в нужных форматах. Для этого в меню "Файл" выбирается "Экспорт", где указываются параметры, такие как формат (например, GeoTIFF для ортофотоплана или TIFF для ЦМР) и система координат - для Алматы была выбрана система координат UTM Zone 43N.

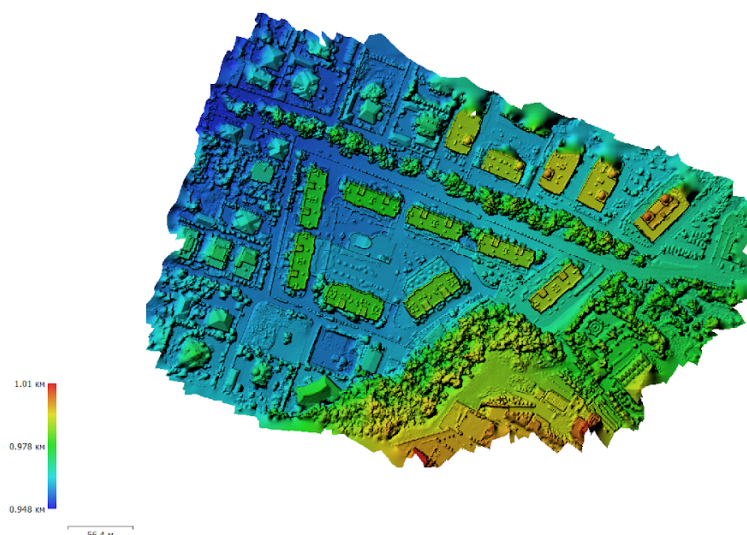


Рисунок 37 — Цифровая модель местности



Рисунок 38 — Ортофотоплан

4.3 Повышение точности оценки шумового загрязнения с учетом вертикальной застройки и экранов

Для повышения точности расчета уровня шума по сравнению с предыдущим анализом, в котором использовались только основные параметры, такие как интенсивность движения, скорость транспорта, расстояние до дороги и тип покрытия, в модель были добавлены дополнительные факторы, которые могут оказывать существенное влияние на распространение звука в городской среде. Это сделало оценку более приближенной к действительности.

Одним из таких факторов стала этажность зданий. С точки зрения акустики, здания могут играть роль как отражающих, так и экранирующих объектов в зависимости от их расположения относительно источника шума и наблюдателя. Чем выше здание, тем больше его влияние на отражение и затенение звуковых волн. В расчетах здания высотой более трех этажей учитывались как более значимые препятствия, способные усиливать отраженный шум.

Для анализа были использованы аэрофотоснимки жилого комплекса «Ак Бота» в городе Алматы (рис. 39).

Для оценки этого эффекта использовалась простая эмпирическая модель (10):

$$D_{hekken} = k_2 \times H \times M \quad (10)$$

где H — это высота забора, M — коэффициент материала (бетон, дерево, сетка), а k_2 — эмпирический множитель, зависящий от плотности конструкции и ее расположения. Например, бетонные заборы оказывали влияние до 5 дБ, тогда как сетчатые конструкции ослабляли шум в пределах лишь 0.3 дБ.

Конечная формула подсчета уровня шума с уточняющими факторами будет выглядеть следующим образом (11):

$$LA_{eq} = E + C_{reflectie} - D_{afstand} - D_{bodem} - D_{hekken} - D_{gebouwen} \quad (11)$$

В Calculate Fields рассчитывается значение уровня шума (рис. 41):

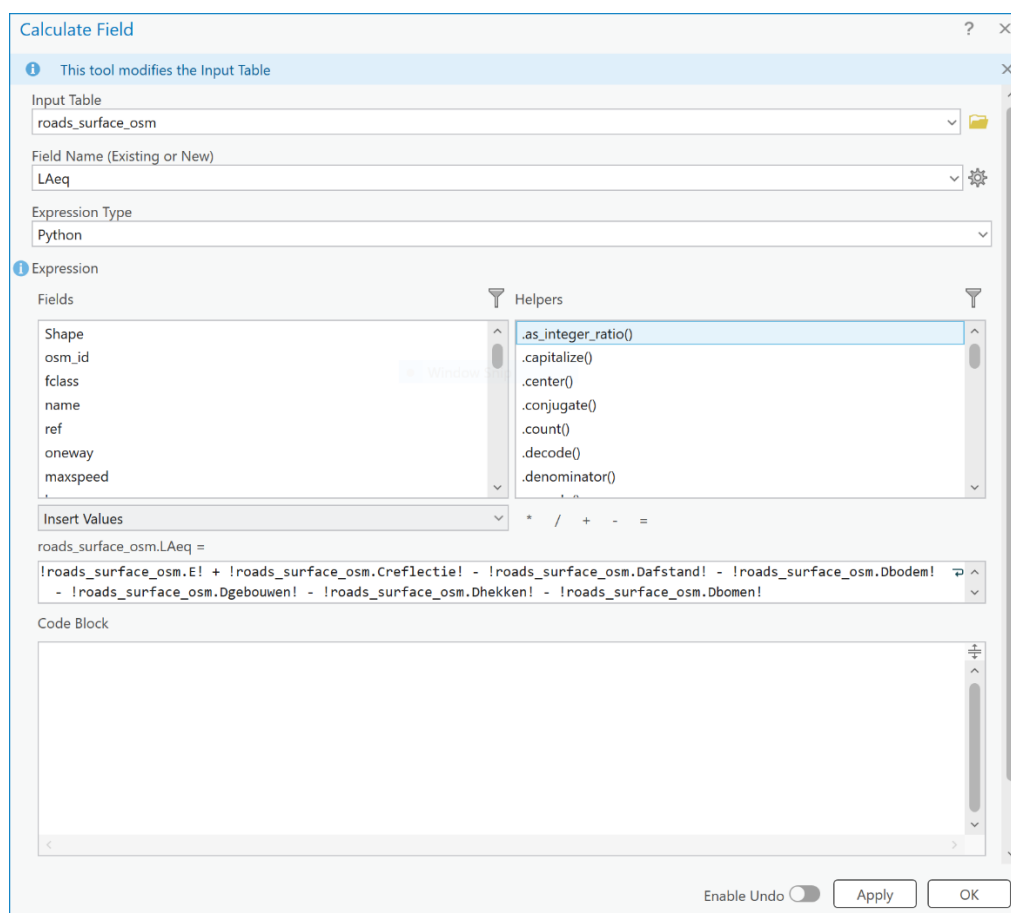


Рисунок 41 — Расчет уровня шума с учетом дополнительных факторов с помощью инструмента Calculate Field

Таким образом, добавление в расчет таких элементов, как этажность зданий и заборы, позволило учесть пространственные особенности застройки и более точно оценить акустическое воздействие на жилую территорию. Такой подход может быть особенно полезен в условиях плотной городской среды, где

даже небольшие архитектурные элементы могут заметно менять уровень воспринимаемого шума (рис. 42–43).

roads_surface_osm

Field: Add Calculate Selection: Select By Attributes Zoom To Switch Clear Delete Copy

		Crefflectie	Dbodem	LAeq	both_sides	OBJECTID *	TARGET_FID	FREQUENCY	SUM_Join_Count	count_buil	Dgebouwen	Dhekken	Dbomen	k1	k2	k3
1	3	2	0	63.007074	0	26637	26637	1	0	0	0	0	0	1.2	0.8	0.2
2	3	2	0	65.653715	0	26638	26638	1	0	0	0	0	0	1.2	0.8	0.2
3	2	2	0	71.105358	0	26640	26640	1	0	0	0	0	0	1.2	0.8	0.9
4	4	2	3	67.01849	0	26645	26645	1	1	0	0	0	0	1.2	0.8	0.9
5	6	2	0	63.394564	0	33888	33888	1	0	0	0	0	0	1.2	0.8	0.9
6	8	2	0	68.270023	0	38398	38398	1	3	0	0	0	0	1.2	0.8	0.9
7	6	0	0	64.333004	0	54932	54932	1	27	0	0	0	0	1.2	0.8	0.9
8	7	0	0	70.270368	0	54935	54935	1	27	0	0	0	0	1.2	0.8	0.8
9	9	0	0	66.237988	0	58439	58439	1	9	0	0	0	0	1.2	0.8	0.2
10	9	0	0	66.237988	0	58440	58440	1	9	0	0	0	0	1.2	0.8	0.2
11	6	0	0	66.40304	0	58441	58441	1	9	0	0	0	0	1.2	0.8	0.9
12	9	0	0	60.393463	0	58442	58442	1	9	0	0	0	0	1.2	0.8	0.2
13	3	0	0	67.040609	0	65337	65337	1	19	0	0	0	0	1.2	0.8	0.2
14	6	0	0	62.881075	0	65504	65504	1	17	0	0	0	0	1.2	0.8	0.5
15	5	0	0	78.036864	0	65505	65505	1	17	0	0	0	0	1.2	0.8	0.8
16	3	0	0	58.271603	0	65506	65506	1	17	0	0	0	0	1.2	0.8	0.3
17	5	0	0	59.907921	0	65507	65507	1	28	0	0	0	0	1.2	0.8	0.3
18	7	0	0	70.656954	0	65508	65508	1	11	0	0	0	0	1.2	0.8	0.9

Activate Windows
Go to Settings to activate Windows.

Рисунок 42 — Значения вычислений шумового загрязнения без повышения точности вычислений

The screenshot shows a software window titled 'roads_surface_osm'. It contains a table with the following columns: Dafstand, R, Crefflectie, Dbodem, LAeq, both_sides, OBJECTID *, TARGET_FID, FREQUENCY, SUM_Join_Count, count. The table lists 18 rows of data, with the first row highlighted in blue. The values for k1, k2, and k3 are consistently 0.8, 0.8, and 0.2 respectively for all rows.

	Dafstand	R	Crefflectie	Dbodem	LAeq	both_sides	OBJECTID *	TARGET_FID	FREQUENCY	SUM_Join_Count	count
1	4.382	23.3749	14.748453	2	0	55.647103	0	26637	26637	1	0
2	4.7239	20.0702	10.08113	2	0	58.2937	0	26638	26638	1	0
3	4.382	15.2766	5.805402	2	0	64.265404	0	26640	26640	1	0
4	4.382	16.3635	6.57924	2	3	60.178503	0	26645	26645	1	1
5	4.382	22.9874	14.104966	2	0	56.554604	0	33888	33888	1	0
6	4.7239	17.4539	7.459228	2	0	61.430001	0	38398	38398	1	3
7	4.7239	19.3909	9.322766	0	0	57.493	0	54932	54932	1	27
8	4.7239	13.4535	4.706267	0	0	63.9904	0	54935	54935	1	27
9	4.7239	17.4859	7.48679	0	0	58.877999	0	58439	58439	1	9
10	4.7239	17.4859	7.48679	0	0	65.117999	0	58440	58440	1	9
11	4.7239	17.3209	7.345866	0	0	59.563	0	58441	58441	1	9
12	4.7239	23.3304	14.673099	0	0	57.473499	0	58442	58442	1	9
13	4.7239	16.6833	6.825973	0	0	59.6806	0	65337	65337	1	19
14	4.7239	20.8428	11.018976	0	0	55.2811	0	65504	65504	1	17
15	4.7239	5.68704	1.92465	0	0	70.19686	0	65505	65505	1	17
16	4.7239	25.4523	18.733323	0	0	50.831601	0	65506	65506	1	17
17	4.7239	23.816	15.516685	0	0	52.4679	0	65507	65507	1	28
18	4.7239	13.0550	4.501307	0	0	63.817	0	65508	65508	1	11

Рисунок 43 — Значения вычислений шумового загрязнения с повышением точности вычислений

4.4 Прогнозирование уровня шумового загрязнения с использованием модели Random Forest

Далее, был проведен анализ с использованием глубокого обучения. Модель Random Forest была обучена для прогнозирования эквивалентного уровня шума на основе пространственных и акустических характеристик дорог. Результат вышел в атрибутивной таблице (рис. 44–45).

```
import arcpy
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import mean_squared_error

# Путь к базе данных и имя слоя
gdb = r"C:\Users\osadc\OneDrive\Documents\ArcGIS\Projects\DLNOISE\DLNOISE.gdb"
layer_name = "roads_dl"
fc = f"{gdb}\\{layer_name}"

# Поля, которые будем использовать
fields = ['OBJECTID', 'E', 'Dafstand', 'R', 'Creflectie', 'Dbodem', 'Dgebouwen', 'LAeq']

# Чтение данных из слоя в DataFrame
data = []
with arcpy.da.SearchCursor(fc, fields) as cursor:
    for row in cursor:
        data.append(row)

df = pd.DataFrame(data, columns=fields)

# Удаляем строки с пропущенными значениями
df = df.dropna()

# Признаки и целевая переменная
X = df[['E', 'Dafstand', 'R', 'Creflectie', 'Dbodem', 'Dgebouwen']]
y = df['LAeq']

# Разделение данных на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,
random_state=42)
```

```

# Обучение модели
model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
model.fit(X_train, y_train)

# Оценка модели
y_pred = model.predict(X_test)
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
print(f"Среднеквадратичная ошибка (MSE): {mse:.2f}")

# Предсказания для всех строк
df['LAeq_predicted'] = model.predict(X)

# Добавим поле LAeq_predicted, если его нет
predicted_field = 'LAeq_predicted'
existing_fields = [f.name for f in arcpy.ListFields(fc)]
if predicted_field not in existing_fields:
    arcpy.AddField_management(fc, predicted_field, "DOUBLE")

# Обновим значения в таблице слоя
with arcpy.da.UpdateCursor(fc, ['OBJECTID', predicted_field]) as cursor:
    for row in cursor:
        obj_id = row[0]
        pred_val = df.loc[df['OBJECTID'] == obj_id, 'LAeq_predicted'].values
        if len(pred_val) > 0:
            row[1] = float(pred_val[0])
            cursor.updateRow(row)

print("Готово! Предсказания записаны в поле LAeq_predicted.")

```

Field: Add Calculate																
Selection: Select By Attributes Zoom To Switch Clear Delete Copy																
	Dafstand	R	Creflectie	Dbodem	LAeq	both_sides	count_buil	Dgebouwen	Dhekken	Dbomen	k1	k2	k3	k	Shape_Length	LAeq_predicted
10639	14.5956	5.367584	0	0	69.786404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	183.290743	69.784772
10640	13.9198	4.965819	0	0	70.462204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	219.482458	70.465774
10641	13.9198	4.965819	0	0	70.462204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	219.482458	70.465774
10642	24.2818	16.371581	0	0	60.100204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92.163847	60.099894
10643	24.2818	16.371581	0	0	60.100204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92.163847	60.099894
10644	24.2818	16.371581	0	0	60.100204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92.163847	60.099894
10645	21.9571	12.527249	0	0	62.424904	0	0	0	0	0	0	0	0	0	116.719922	62.423032
10646	5.89472	1.971225	0	0	78.487284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1788.241917	78.485005
10647	5.89472	1.971225	0	0	78.487284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1788.241917	78.485005
10648	5.89472	1.971225	0	0	78.487284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1788.241917	78.485005
10649	5.89472	1.971225	0	0	78.487284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1788.241917	78.485005
10650	5.89472	1.971225	0	0	78.487284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1788.241917	78.485005
10651	17.8776	7.83213	0	0	68.173899	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25.038792	68.186535
10652	21.5665	11.97638	0	0	64.484999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25.174799	64.463787
10653	29.2913	29.144982	0	0	56.760199	0	0	0	0	0	0	0	0	0	173.078352	56.760199
10654	29.2913	29.144982	0	0	56.760199	0	0	0	0	0	0	0	0	0	173.078352	56.760199

Рисунок 44 — Результаты расчетов

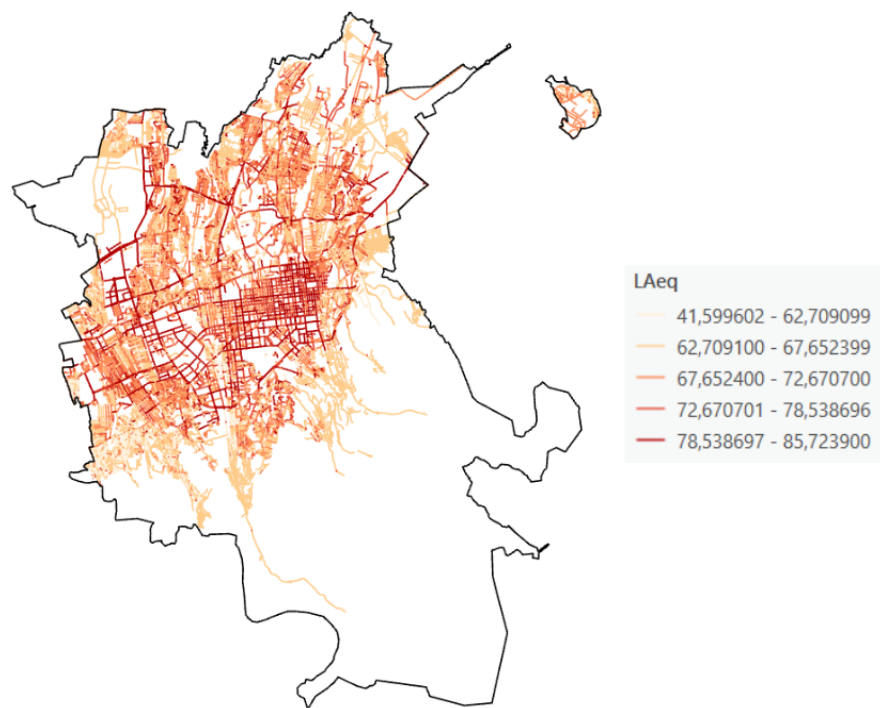


Рисунок 45 — Карта уровня шума по улицам

5. Анализ загрязнения атмосферного воздуха на основе спутниковых данных sentinel-5p

5.1. Теоретическое обоснование и актуальность

Качество атмосферного воздуха является одним из ключевых показателей экологического состояния городской среды. Оно оказывает непосредственное влияние на здоровье населения, биологическое разнообразие, урбанистический комфорт и общую устойчивость городской экосистемы. Особенно остро проблема загрязнения воздуха стоит в мегаполисах с высокой плотностью застройки и интенсивной транспортной нагрузкой, к числу которых относится Алматы. Рельефные особенности — в частности, положение в предгорьях и наличие инверсионного слоя — способствуют накоплению загрязняющих веществ в нижних слоях атмосферы, особенно в зимние месяцы.

Среди различных видов антропогенных загрязнителей одним из наиболее опасных и широко распространённых является диоксид азота (NO_2). Этот газ образуется главным образом в результате сгорания ископаемого топлива — как в двигателях внутреннего сгорания транспортных средств, так и на промышленных объектах, включая теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). Диоксид азота оказывает раздражающее воздействие на органы дыхания, особенно у детей и пожилых людей, способствует формированию вторичных загрязнителей (озона, $\text{PM}_{2.5}$), а также усугубляет хронические заболевания лёгких и сердечно-

сосудистой системы. В связи с этим мониторинг и пространственная оценка концентраций NO₂ в городской атмосфере приобретают особую значимость.

В последние годы, наряду с традиционными наземными методами наблюдения, активно развиваются дистанционные методы мониторинга, основанные на спутниковых данных. Одной из наиболее точных и современных платформ для таких задач является европейский спутник Sentinel-5P, функционирующий в рамках программы Copernicus. Он оснащён спектрометром TROPOMI, обеспечивающим высокоточное измерение содержания различных загрязнителей, включая диоксид азота, озон, сернистый газ, формальдегид и другие.

В данном исследовании были использованы спутниковые данные Sentinel-5P (продукт L3_NO2), характеризующиеся высоким пространственным разрешением и ежедневной глобальной съёмкой. Это позволило оценить динамику загрязнения воздуха в городе Алматы в период с 2019 по 2024 годы с учётом сезонных и межгодовых колебаний.

5.2. Методика обработки данных и описание скрипта в Google Earth Engine

Для обработки и визуализации данных Sentinel-5P использовалась облачная платформа Google Earth Engine (GEE), обладающая широким набором инструментов для анализа спутниковых изображений и проведения пространственно-временной агрегации. Работа велась в программной среде JavaScript, встроенной в интерфейс GEE, с применением географических границ города Алматы.

Скрипт, разработанный в рамках исследования, позволил автоматически загрузить данные о столбовой плотности NO₂ (в mol/m²), агрегировать их по месяцам в пределах административной границы города и сформировать визуальную карту (рис. 46) и график наглядного анализа (рис. 47). На первом этапе в платформу была загружена граница города в виде слоя в формате FeatureCollection, затем выполнена фильтрация изображений Sentinel-5P по датам и пространству.

На следующем этапе производилась агрегация данных по месяцам и построение цветовой визуализации с использованием палитры из 40 градаций. Также был рассчитан средний уровень загрязнения NO₂ за весь период наблюдений. Ниже приведён основной скрипт:

```
// 1. Загрузка границ Алматы
var almaty_boundary = ee.FeatureCollection("projects/ee-kristinaosa00/assets/almaty_boundary");
Map.centerObject(almaty_boundary, 10);
Map.addLayer(almaty_boundary, {color: 'black'}, 'Границы Алматы');
// 2. Задание временного диапазона
var startYear = '2019';
```



```

var endYear = '2024';
// 3. Загрузка и фильтрация данных Sentinel-5P NO2
var no2Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_NO2')
  .select('NO2_column_number_density')
  .filterDate(startYear + '-01-01', endYear + '-12-31')
  .filterBounds(almaty_boundary);
// 4. Создание месячных средних композитов
var yearsList = ee.List.sequence(ee.Number.parse(startYear),
ee.Number.parse(endYear).subtract(1));
var monthsList = ee.List.sequence(1, 12);
var monthlyNO2 = ee.ImageCollection(yearsList.map(function(year) {
  return monthsList.map(function(month) {
    var monthlyImage = no2Collection
      .filter(ee.Filter.calendarRange(year, year, 'year'))
      .filter(ee.Filter.calendarRange(month, month, 'month'))
      .mean()
      .set('system:time_start', ee.Date.fromYMD(year, month, 1).millis());
    return monthlyImage;
  });
}).flatten());
// 5. Цветовая палитра визуализации (в  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )
var visParams = {
  min: 0,
  max: 200,
  palette: [
    '440154', '450457', '46085a', '470d5c', '48135f', '481a61', '482062', '472665',
    '462c67', '453369', '43396b', '423f6d', '3f466f', '3d4c70', '3a5272', '385874',
    '345f75', '316576', '2d6b77', '297178', '257779', '217d79', '1d8379', '198879',
    '169e78', '1aae76', '30bd72', '4dcb6b', '6cd763', '8ae35a', 'aae94f', 'c9ee45',
    'e6f33a', 'f1d736', 'f5ba32', 'f99d2d', 'fb8029', 'fc6325', 'fc4521', 'fb2a1d'
  ]
};
// 6. Расчёт среднего значения NO2 за весь период
var meanNO2 = monthlyNO2.mean().clip(almaty_boundary).multiply(1e6);
Map.addLayer(meanNO2, visParams, 'Средний NO2 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )).
// 7. График временных изменений
print(
  ui.Chart.image.series({
    imageCollection: monthlyNO2,
    region: almaty_boundary,
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    scale: 7000,
    xProperty: 'system:time_start'
  }).setOptions({

```

```

title: 'Ежемесячные уровни NO2 (2019–2024)',
vAxis: {title: 'Концентрация NO2 (mol/m2)'},
hAxis: {title: 'Год'},
series: {0: {color: 'red'}},
pointSize: 4
})
);

```

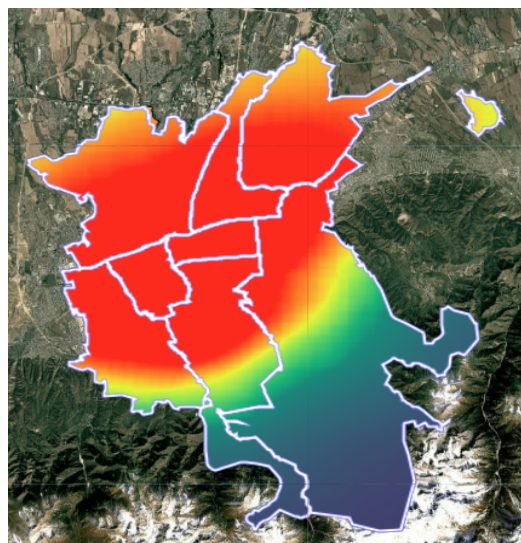


Рисунок 46 — Карта концентрации NO₂



Рисунок 47 — График ежемесячных уровней NO₂

5.3. Результаты анализа и интерпретация

Полученная диаграмма временной динамики отчётливо отражает сезонные колебания загрязнения: летом фиксируются минимальные значения концентрации NO₂, тогда как зимой — максимальные. Это объясняется комплексом факторов: снижением использования личного транспорта в летние месяцы, улучшением условий для рассеивания загрязнителей и отсутствием

отопительного сезона. В зимнее время активная работа ТЭЦ и рост выбросов от автотранспорта на фоне температурных инверсий и низкой скорости ветра способствуют накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

Таким образом, дистанционный мониторинг при помощи спутников Sentinel-5P доказал свою эффективность как в ретроспективном анализе, так и в оперативной оценке загрязнения воздуха. Полученные данные могут быть использованы при экологическом нормировании, разработке мер по снижению выбросов, планировании общественного транспорта и озеленении города с учётом зон наибольшей концентрации вредных веществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование направлено на оценку пространственных трансформаций городской среды города Алматы с использованием многокомпонентных геоинформационных подходов. Интеграция данных дистанционного зондирования, векторных и статистических источников в рамках единого аналитического пространства позволила выявить закономерности урбанизации и оценить её влияние на экологические параметры городской территории.

Анализ изменения административных границ показал устойчивую тенденцию к расширению городской черты и вовлечению пригородных территорий в структуру застройки. Это, в свою очередь, повлияло на перераспределение функциональных зон и развитие инфраструктуры.

Использование индекса застроенности (NDBI) и метода пространственного анализа горячих точек позволило выделить участки с повышенной плотностью застройки и провести предварительное картографирование урбанизированных зон. При этом выявлены ограничения метода, связанные с особенностями рельефа и ложной классификацией открытых поверхностей, что подчёркивает необходимость применения дополнительных источников верификации.

На основе анализа спутниковых данных температуры поверхности (LST) за несколько лет и расчёта регрессионной модели установлено, что плотность застройки оказывает положительное влияние на уровень температуры, тогда как наличие растительного покрова способствует её снижению. Выявленные зависимости статистически значимы и подчеркивают важность интеграции зелёных насаждений в городскую среду с целью климатического регулирования.

В дополнение к этому разработана пространственная модель оценки шумового загрязнения, основанная на геометрии застройки и транспортной сети. Модель позволила провести картографическую визуализацию акустической нагрузки без применения приборных измерений, что демонстрирует потенциал ГИС-подходов в экологическом мониторинге.

Таким образом, результаты исследования подтверждают эффективность использования ГИС и дистанционного зондирования для комплексной оценки урбанистических и экологических процессов. Предложенная методика может быть применена при разработке инструментов устойчивого городского планирования и территориального управления, ориентированных на минимизацию антропогенной нагрузки и повышение качества городской среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ArcGIS [Электронный ресурс]: Галерея уроков – Оценка доступа к общественному транспорту. – Режим доступа: <https://learn.arcgis.com/ru/projects/assess-access-to-public-transit/>
2. USGS EarthExplorer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
3. Farcaş F., Sivertun Å. Road traffic noise: GIS tools for noise mapping and a case study for Skåne region // *Environmental Modelling & Software*. – 2009.
4. Patel S., Indraganti M., Jawarneh R. N. A comprehensive systematic review: Impact of Land Use/Land Cover (LULC) on Land Surface Temperatures (LST) and outdoor thermal comfort // *Sustainable Cities and Society*. – 2024.
5. Bao-Jie He, Lan Ding, Deo Prasad, «Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence», 2020
6. Nugmanova, A., Arndt, W.-H., Hossain, M. A., & Kim, J. R., «Effectiveness of Ring Roads in Reducing Traffic Congestion in Cities for Long Run: Big Almaty Ring Road Case Study», 2019
7. В Алматы образован новый район // *Крыша* [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <https://krisha.kz/content/news/2014/v-almaty-obrazovan>
8. Постановление Правительства Республики Казахстан от 06.11.2013 № 1163 «Об образовании нового административного района в черте города Алматы» // *Континент – Онлайн* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://continent-online.com/Document/?doc_id=31324374
9. Карта Алматы (2003) // *Retromap.ru* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://retromap.ru/152003>
10. Historic Maps of Verny, Alma-Ata, and Almaty // *Walking Almaty* [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <https://www.walkingalmaty.com/post/historic-maps-of-verny-alma-ata-and-almaty>
11. Zhang, L., Liu, Z., Ren, T., Gong, D., Lin, D., Lee, S., Zhang, H., & Wang, P. Deep learning for remote sensing image classification: A survey // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 2018.
12. Gao, Z., Wu, Z., Zhang, X., Wang, Y., & Zhang, J. Deep learning for urban land use category classification: A review and experimental assessment // *Sustainable Cities and Society*. 2024.
13. Wang, J., & Biljecki, F. A spatial analysis of urban streets under deep learning based on street view imagery: Quantifying perceptual and elemental perceptual relationships // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023.
14. Neysani, B., Khosravi, H., Mohammadi, M., & Gholami, M. Assessment of noise pollution-prone areas using an explainable geospatial artificial intelligence approach // *Environmental Advances*. 2024.

15. Quattrochi, D. A., & Luvall, J. C. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue // Remote Sensing of Environment. 2014.
16. Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. Machine learning for spatial analyses in urban areas: A scoping review // Computers, Environment and Urban Systems. 2023.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Осадчая Кристина, Шакарова Дильназ

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Интеграция методов глубокого обучения и многокомпонентных ГИС для пространственного анализа изменений городской среды на примере города Алматы

Научный руководитель: Айнур Ержанқызы

Коэффициент Подобия 1: 2.5

Коэффициент Подобия 2: 1.1

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

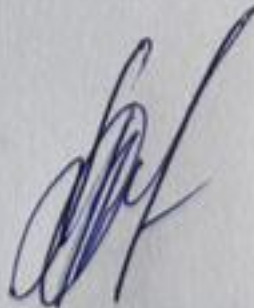
☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата

10.06.



Заведующий кафедрой

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Осадчая Кристина, Шакарова Дильназ

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Интеграция методов глубокого обучения и многокомпонентных ГИС для пространственного анализа изменений городской среды на примере города Алматы

Научный руководитель: Айнур Ержанқызы

Коэффициент Подобия 1: 2.5

Коэффициент Подобия 2: 1.1

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 10.06.2022.

Васурбай 6
проверяющий эксперт

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Осадчая Кристина Денисовна, Шакарова Дильназ Ерлановна
(Ф.И.О. обучающегося)

6B07303 Геопространственная цифровая инженерия
(шифр и наименование ОП)

На тему: Интеграция методов глубокого обучения и многокомпонентных ГИС для пространственного анализа изменений городской среды на примере города Алматы

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В представленной дипломной работе выполнен комплексный пространственный анализ городской среды города Алматы с использованием методов глубокого обучения и многокомпонентных геоинформационных систем, что соответствует современным задачам геодезии, картографии и устойчивого развития. Шакарова Д.Е. и Осадчая К.Д., обоснованно применяют инструменты пространственного анализа, эффективно объединяя данные о транспортной и строительной инфраструктуре, температурных аномалиях, шумовом загрязнении и загрязнении воздуха.

Одним из важных направлений исследования стал анализ изменений плотности застройки на основе данных дистанционного зондирования Земли. Использование индекса NDBI позволило оценить пространственно-временную динамику урбанизации в пределах города Алматы в период с 2014 по 2024 год. Такой подход стал надёжным инструментом для визуализации и интерпретации процессов уплотнения застройки, особенно в контексте нарастающего антропогенного воздействия. Авторы грамотно применили спутниковые данные, выделили участки с повышенными значениями температуры поверхности (LST), и связали их с плотностью и конфигурацией застройки, что позволило построить точные тепловые карты и выявить зоны с выраженным городским тепловым эффектом.

Особое внимание в дипломной работе уделено моделированию уровней шумового загрязнения. На первом этапе студенты применили геоинформационные методы расчёта эквивалентного уровня шума (L_{Aeq}) на основе параметров улично-дорожной сети, включая интенсивность движения, скорость транспорта, расстояние до зданий и акустические характеристики покрытия. В дальнейшем модель была значительно улучшена за счёт добавления новых пространственных переменных, таких как этажность зданий и наличие шумозащитных конструкций. Это позволило более точно смоделировать распространение шума в условиях плотной городской застройки.

Важным этапом стало внедрение алгоритмов глубокого обучения. Студенты успешно применили модель Random Forest для прогнозирования уровня шумового загрязнения, используя обучающие выборки, полученные из векторных слоёв и спутниковых данных. Это позволило не только повысить точность оценки, но и автоматизировать процесс пространственного прогнозирования уровня шума на всей территории исследования. Такой подход демонстрирует высокий уровень владения современными технологиями анализа пространственных данных и знаниями в области машинного обучения.

Дополнительной значимой частью исследования стал анализ загрязнения воздуха диоксидом азота (NO_2) с использованием платформы Google Earth Engine и данных спутника Sentinel-5P. Авторы разработали скрипт для загрузки, фильтрации и усреднения спутниковых наблюдений по временным и пространственным критериям, что позволило выявить районы с повышенной концентрацией загрязняющих веществ. Использование

Ф КазНТУ 706-17. Рецензия

облачной платформы GEE обеспечило высокую скорость обработки больших объёмов данных и интеграцию с другими источниками пространственной информации. Результаты анализа были сопоставлены с плотностью транспортной сети и плотностью застройки, что подтвердило влияние урбанизации на ухудшение качества воздуха.

Следует отметить высокий уровень владения студентами как геоинформационными системами, так и инструментами глубокого обучения и спутникового мониторинга. Применение таких знаний позволило выполнить комплексную оценку состояния городской среды с учётом экологических, акустических и тепловых факторов, а также разработать эффективную методику пространственного анализа на стыке геоинформатики и экологического моделирования. Работа выполнена с соблюдением принципов точности пространственного позиционирования и сопровождается качественным картографическим материалом.

Оценка работы

Дипломная работа Осадчей К. Д. и Шакаровой Д. Е. представляет собой логически завершённую и хорошо иллюстрированную выпускную работу, отвечающую всем требованиям, предъявляемым к дипломным работам.

Дипломная работа заслуживает оценки 95% и рекомендуется к защите, а Осадчая К.Д. и Шакарова Д.Е. присвоению академической степени бакалавра.

Рецензент

К.т.н., ассоц. Проф-исследователь

Зав. Кафедрой "Геодезия и картография, кадастр

МОК



Кузнецова И. А.

06 2025 г

Подпись _____
Зав. кафедрой _____
HR - DEPARTMENT _____
« ____ » ____ 20 ____

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Отзыв дипломного руководителя

Дипломный проект

Осадчая Кристина Денисовна
Шакарова Дильназ Ерлановна

6B7303 – Геопространственная цифровая инженерия

Тема: «Интеграция методов глубокого обучения и многокомпонентных ГИС для пространственного анализа изменений городской среды на примере города Алматы»

Дипломная работа Осадчей К.Д. и Шакаровой Д.Е. посвящена одной из наиболее актуальных проблем современной урбанистики — оценке трансформаций городской среды в условиях ускоренной урбанизации, с использованием методов многокомпонентного геоинформационного анализа. Работа демонстрирует высокий уровень технической и научной проработки, отличается междисциплинарным подходом и применением прогрессивных ГИС-технологий. Исследование опирается на интеграцию разнородных пространственных данных, включая температурные аномалии (LST), плотность застройки, наличие зелёных зон, концентрации загрязнителей (NO_2), транспортную инфраструктуру и демографические характеристики. На основе этих данных авторами разработаны тематические карты, что позволило комплексно отразить состояние городской среды и выявить закономерности её изменений.

Особого внимания заслуживает реализация пространственного регрессионного анализа, в ходе которого было установлено статистически значимое влияние структурных характеристик городской среды (застройка, озеленение) на температурный режим. Выводы исследования подтверждены статистической достоверностью ($p < 0.001$, $R^2 = 0.469$). Подобный подход позволяет использовать полученные результаты в целях климатического адаптивного планирования и разработки природоориентированных решений.

Дополнительный научный интерес представляет блок анализа шумового загрязнения, реализованный без применения полевых измерений, а на основе алгоритмической оценки эквивалентного уровня шума с использованием Python-скриптов, OSM-данных и пространственного моделирования в ArcGIS. Такая методология отличается инновационностью и высокой степенью автоматизации.

Дипломная работа демонстрирует системность мышления авторов, их владение инструментами геопространственного анализа, умение интерпретировать сложные многомерные данные и формулировать практико-ориентированные выводы.

Рекомендую присвоение степени бакалавра по образовательной программе 6B07303 — «Геопространственная цифровая инженерия». Рекомендуемая итоговая оценка: 98 баллов из 100.

Дипломный руководитель
PhD, Старший преподаватель
Ержанқызы А.