

Код МРНТИ 36.16.39

Г.Н. Махметова^{1,2}, *Ж. Бимурат¹, А.А. Балтиева¹, С. Гребби³
¹Институт горного дела имени Д.А. Кунаева (г. Алматы, Казахстан),
²Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),
³The University of Nottingham (г. Ноттингем, Англия)

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ КЕНТАУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. Статья посвящена комплексному пространственному анализу наблюдательной геодезической сети города Кентау с использованием современных методов геоинформатики. Для оценки равномерности и эффективности размещения пунктов площадного геодинамического мониторинга применены кластеризация DBSCAN, полигоны Тиссена, индекс Морана I и буферный анализ. Установлено, что в центральной части города наблюдаются устойчивые кластеры, а на периферии – дефицит пунктов площадного геодинамического мониторинга, снижающий чувствительность мониторинга. Сопоставление с данными спутниковой интерферометрии подтвердило выявленные закономерности. Новизна работы состоит в интеграции ГНСС-измерений, InSAR-анализа и пространственного моделирования для оптимизации сети.

Ключевые слова: наблюдательная геодезическая сеть, пространственный анализ, ГНСС измерения, кластеризация DBSCAN, полигоны Тиссена, индекс Морана I, буферный анализ, спутниковая интерферометрия.

Геоаппаратные технологии арқылы Кентау қаласының геодезиялық бақылау желісінің кеңістіктік талдауы
Аннотация. Мақала Кентау қаласының геодезиялық бақылау желісін заманауи геоаппараттық әдістер арқылы кешенді талдауға арналған. Аландық геодинамикалық бақылау пункттерінің біркелкілігі мен тиімділігін бағалау үшін DBSCAN кластерлеу алгоритмі, Тиссен полигоны, Моран I индексі және буферлік талдау әдістері қолданылды. Зерттеу нәтижесінде қаланың орталық бөлігінде тұрақты кластерлердің бар екені және шет аймақтарда бақылау пункттердің жетіспеушілігі анықталды. Бұл жерүсті геодезиялық бақылаудың сезімталдығын төмендетеді. Жерсеріктік интерферометрия деректері бұл заңдылықтарды растады. Жұмыстың жаңалығы – ЖНЖЖ (ГНСС) өлшемдері, InSAR талдауы және кеңістіктік модельдеуді біріктіру арқылы бақылау желісін оңтайландыру.

Түйінді сөздер: геодезиялық бақылау желісі, кеңістіктік талдау, ЖНЖЖ өлшемдері, DBSCAN кластерлеу, Тиссен полигоны, Моран I индексі, буферлік талдау, жерсеріктік интерферометрия.

Spatial analysis of Kentau's geodetic monitoring network using geoinformatics technologies

Abstract. This article presents a comprehensive spatial analysis of the geodetic monitoring network in Kentau city using modern geoinformatics methods. To assess the uniformity and efficiency of the placement of geodynamic monitoring points such algorithms as DBSCAN clustering, Thiessen polygons, Moran's I spatial autocorrelation index, and buffer analysis were applied. The study revealed stable clusters in the central part of the city and a lack of monitoring points in peripheral areas, which reduces the sensitivity of ground-based monitoring. Comparison with satellite interferometry (InSAR) data confirmed the reliability of the spatial patterns identified. The novelty of the research lies in the integration of GNSS measurements, InSAR analysis, and spatial modeling to optimize the monitoring network.

Key words: geodetic monitoring network, spatial analysis, GNSS measurements, DBSCAN clustering, Thiessen polygons, Moran's I index, buffer analysis, satellite interferometry.

Введение

Актуальность темы исследования. Обеспечение геодинимической безопасности урбанизированных территорий, расположенных в зонах активного недропользования, является одной из приоритетных задач современной геодезии. Для города Кентау, находящегося в зоне интенсивных горных разработок, мониторинг деформаций земной поверхности имеет критическое значение. Риски возникновения оседаний и сдвигов почвы требуют наличия высокоточной и, что не менее важно, пространственно сбалансированной наблюдательной геодезической сети. Однако традиционные подходы к построению таких сетей часто приводят к неравномерному покрытию территории: высокой плотности пунктов в центре и их дефициту на периферии. Это снижает чувствительность мониторинга и может привести к пропуску субклинических деформаций, предшествующих техногенным авариям. В связи с этим, применение современных геоинформационных технологий (ГИС) для пространственного анализа и оптимизации сети становится необходимым условием эффективного мониторинга.

Обзор литературы. Вопросы оценки эффективности расположения геодезических пунктов и анализа их пространственного распределения широко освещены в зарубежных и отечественных исследованиях. Теоретическая база использования ГИС для оценки пространственного неравенства и дисперсии контрольных точек была

детально проработана в трудах Zhang и др. [1], которые использовали индекс Морана I для выявления закономерностей размещения. Практическое применение методов пространственного анализа для оценки распределения контрольных пунктов на локальных территориях (университетские кампусы, городские районы) рассматриваются в работе Ayodele и др. [2], подтверждающих эффективность ГИС-инструментария для выявления зон недостаточного покрытия.

Особый интерес представляют исследования, направленные на интеграцию наземных и спутниковых методов мониторинга. Так, Owczarз и Blachowski [3] продемонстрировали эффективность совместного использования методов дифференциальной спутниковой интерферометрии (DInSAR) и пространственной статистики для анализа смещений поверхности. Macchiariulo и др. [4] развили это направление, предложив автоматизированные системы GIS-InSAR для мониторинга инфраструктурных сетей.

В Казахстане исследования геодинимических процессов с применением геоинформационного анализа проводились Жантаевым и др. [5] на примере города Алматы. Вопросы инженерного геодинимического районирования горных территорий с использованием ГИС-технологий рассматриваются в работах Куропаткиной и Любимова [6]. Особенности создания высокоточного спутникового позиционирования на карьерах Казахстана освещены в исследованиях Балтиева и др. [7]. Однако, несмотря

на наличие обширной теоретической базы [1–11], применение комплекса методов кластеризации DBSCAN, пространственной автокорреляции и верификации данных посредством InSAR для оптимизации городской геодезической сети в условиях Кентау ранее детально не рассматривалось, что определяет новизну настоящего исследования.

Постановка проблемы. Проблема текущей наблюдательной сети г. Кентау заключается в выраженной пространственной неоднородности. Анализ 40 геодезических пунктов, задействованных в сериях измерений 2019–2020 гг., выявил их чрезмерную концентрацию в центральной части города и существенный дефицит на периферии. Такая конфигурация снижает репрезентативность данных и чувствительность сети к деформациям в промышленных и окраинных районах города.

Цели и задачи исследования. Целью данной работы является проведение комплексного пространственного анализа наблюдательной геодезической сети г. Кентау для оценки ее эффективности и разработки рекомендаций по оптимизации размещения пунктов ГНСС с интеграцией данных спутниковой интерферометрии.

Методы исследования

Район исследования и характеристика геодезической сети. Объектом исследования является геодезической полигон в пределах города Кентау (Туркестанская область, Казахстан), сформированный для мониторинга деформаций и включающий новые станции, пункты государственной геодезической сети (ГГС) и ранее заложенные репера. В начальной серии наблюдений (27.11.2019) сеть состояла из 32 ГНСС-пунктов, 5 пунктов ГГС и 4 реперов, а к четвертой серии (01.10.2020) – из 30 ГНСС-пунктов, 4 пунктов ГГС и тех же 4 реперов. Всего в анализ включены координаты 40 точек, охватывающих территорию около 72 км². Размещение новых станций осуществлялось с учетом устойчивого основания, качества спутникового сигнала, транспортной доступности и репрезентативности, при этом взаимная видимость не требовалась благодаря использованию ГНСС-технологий.

Источники данных. В качестве исходных данных использовались пространственные координаты 40 геодезических пунктов, полученные в ходе четырех серий ГНСС-измерений 2019–2020 гг., выполненных в дифференциальном режиме с субсантиметровой точностью. Кроме того, для оценки вертикальных смещений применялись высотные изменения между сериями и данные спутниковой интерферометрии Sentinel-1, по которым были построены карты оседаний и подъемов поверхности.

Программное обеспечение и инструменты ГИС. Пространственный анализ проводился в ArcGIS Pro с модулями Spatial Analyst и Geostatistical Analyst, включая инструменты Buffer и Select Layer by Location для оценки инфраструктурного покрытия (рис. 1–2), Point Density – для расчета плотности пунктов (рис. 3), Generate Thiessen Polygons – для построения зон влияния (рис. 5) и Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) – для оценки упорядоченности сети (рис. 6). Кластеризация выполнялась в алгоритме DBSCAN, а визуализация и экспорт карт в QGIS.

Результаты

Буферный анализ применялся для оценки охвата территории зонами влияния геодезических пунктов. Вокруг каждого пункта были построены буферные зоны радиусом 50 и 100 метров, что соответствует средним размерам городских кварталов и обеспечивает реалистичную оценку зоны действия наблюдательной станции в условиях городской застройки. Буферизация в ArcGIS представляет собой инструмент пространственного анализа, формирующий полигональную зону на фиксированном расстоянии от выбранных объектов, будь то точки, линии или полигоны. Для точечных объектов создаются круговые буферы, для линейных – зоны с прямолинейными краями, а для полигональных – расширенные контуры, соответствующие геометрии исходного объекта. Построенные зоны используются для анализа пространственного перекрытия и визуализации плотности покрытия. В данном исследовании инструмент Select Layer by Location позволил оценить степень перекрытия буферных зон с элементами транспортной и жилой инфраструктуры, выявить неохваченные участки и определить зоны с возможным дефицитом наблюдений (рис. 1–2).

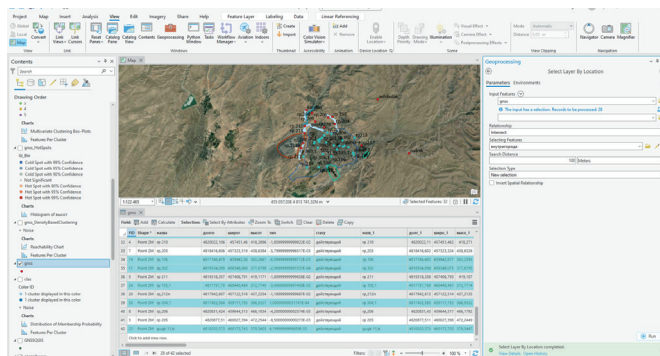


Рис. 1. Объединенная карта буферных зон 50 и 100 м. Сурет 1. 50 және 100 м буферлік аймақтардың біріктірілген картасы.

Figure 1. Combined map of 50 m and 100 m buffer zones.

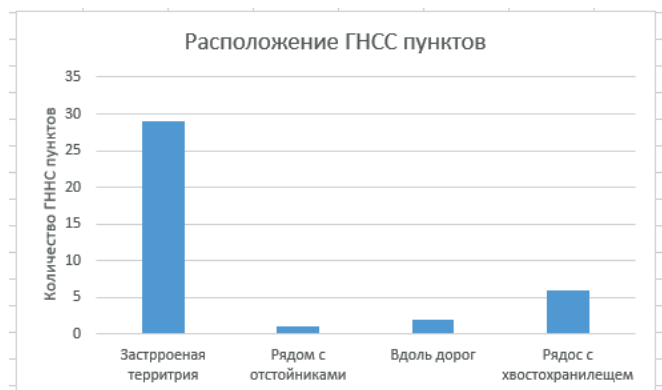


Рис. 2. Типизация застройки и размещение геодезических пунктов.

Сурет 2. Құрылысты типтендіру және геодезиялық пункттердің орналасуы.

Figure 2. Typification of buildings and location of geodetic points.

Пространственный анализ плотности, выполненный с помощью Point Density в ArcGIS Pro, позволил построить растровый слой распределения наблюдательных геодезических пунктов и выявить существенные различия в их концентрации: при средней плотности 0.55 точки/км² в центре города она превышает 0.8 точки/км², тогда как на периферии снижается до 0.3 точки/км². Дополнительный анализ транспортной доступности показал, что около 90% пунктов находятся в пределах 200 м от дорог с твердым покрытием, что обеспечивает удобство обслуживания и оперативность геодезических измерений (рис. 3).

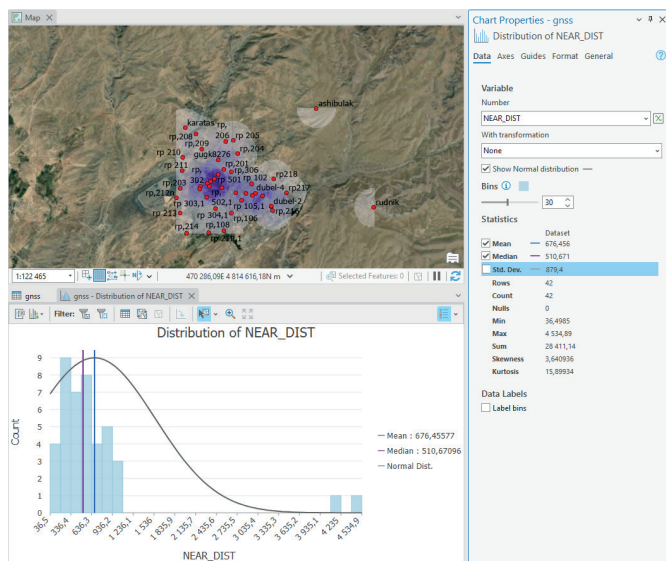


Рис. 3. Карта плотности и гистограмма ближайших расстояний между ГНСС пунктами.

Сурет 3. ЖНЖЖ пункттері арасындағы ең жақын қашықтықтардың тығыздық картасы мен гистограммасы.

Figure 3. Density map and histogram of nearest distances between GNSS points.

Для изучения пространственной структуры наблюдательной геодезической сети применен алгоритм **кластеризации DBSCAN** ($\epsilon = 300$ м, $min\ samples = 3$), что позволило выявить уплотненные группы пунктов и изолированные станции. Анализ показал наличие 5 устойчивых кластеров и 3 одиночных пунктов, не входящих в кластерные образования (рис. 4), что позволило оценить согласованность сети и выделить участки с недостаточной концентрацией наблюдений.

Для оценки зон влияния каждой станции были построены **полигоны Тиссена**, позволяющие определить территориальное покрытие пунктов: каждая точка внутри такого полигона расположена ближе к соответствующему ГНСС-пункту, чем к другим. Это позволяет выявить участки с возможным дефицитом наблюдений; на рис. 5 показаны полигоны с привязкой к пунктам *rp_201*, *rp_210*, *dubel-1*, *rudnik* и др., отображающие их пространственное влияние.

Анализ полигонов Тиссена выявил высокую плотность сети в центре города (полигоны пунктов *guko*, *rp_301*, *rp_302* небольшие и равномерные) и разреженность

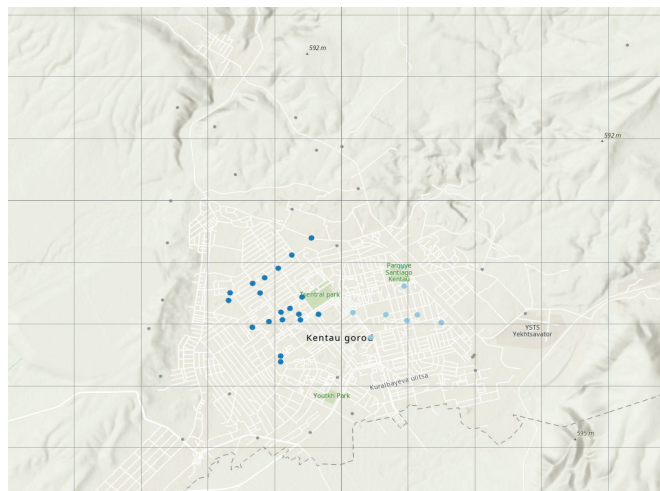


Рис. 4. Результат метода DBSCAN. Сурет 4. DBSCAN әдісінің нәтижесі. Figure 4. Result of the DBSCAN method.

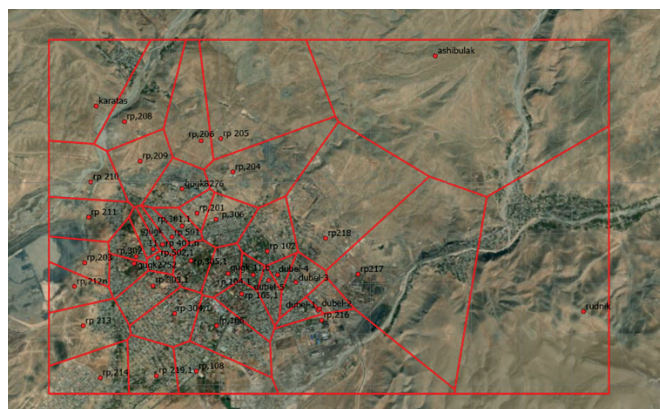


Рис. 5. Полигоны Тиссена. Сурет 5. Тиссен полигондары. Figure 5. Thiessen polygons.

на периферии: станции *karatas*, *ashibulak* и *rudnik* имеют крупные полигоны влияния, что указывает на снижение чувствительности мониторинга в восточной и северо-восточной частях. Поскольку эти пункты ГГС изначально размещались за пределами зоны наблюдения, метод полигонов Тиссена оказался полезным для оценки пространственного охвата сети, интерпретации деформационных процессов и планирования ее модернизации.

Для оценки закономерностей размещения геодезических пунктов был использован инструмент **Spatial Autocorrelation (Global Moran's I)** в ArcGIS Pro, где при пороговом расстоянии взаимодействия 2000 м значение индекса составило $I = 0.1413$ ($z = 3.91$; $p = 0.000093$), что свидетельствует о статистически значимой, умеренно положительной пространственной автокорреляции ($p < 0.01$) и подтверждает кластерный, а не случайный характер распределения точек наблюдений (рис. 6).

Кластеризация пунктов объясняется сочетанием пространственных и инфраструктурных факторов: ориентацией вдоль транспортных коридоров и жилой застройки, традиционными маршрутами наблюдений, концентрацией станций в геотехнически уязвимых зонах и ограни-

Global Moran's I Summary

Moran's Index	0,141308
Expected Index	-0,024390
Variance	0,001796
z-score	3,909435
p-value	0,000093

Distance measured in Meters

Succeeded at среда, 28 мая 2025 г. 13:41:20 (Elapsed Time: 3,84 seconds)

Рис. 6. Результат расчета глобального индекса Морана.

Сурет 6. Жаһандық Моран индексіні есептеу нәтижесі.
Figure 6. Result of global Moran's index calculation.

чениями установки оборудования в промышленных или труднодоступных районах. Метод Морана I подтвердил структурированность сети мониторинга, что указывает на необходимость дальнейшего анализа и локального уплотнения пунктов для сбалансированного пространственного покрытия.

Для интегральной оценки пространственной структуры вертикальных движений земной поверхности использовалась процедура сравнения результатов спутниковой интерферометрии (InSAR) и модели, построенной *методом интерполяции кригинга* по разнице высот между двумя сериями ГНСС-наблюдений. Интерполяционная поверхность (рис. 7) была сформирована на основе координатных изменений пунктов с учетом пространственной автокорреляции, характерной для геодинамических процессов.

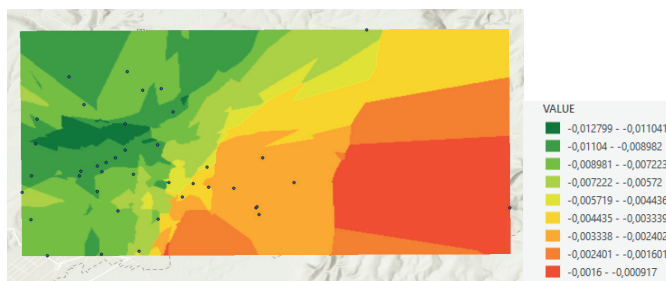


Рис. 7. Метод интерполяции по разнице высот 2 и 1 серий.

Сурет 7. 2 және 1 сериялардың биіктік айырмасы бойынша интерполяция әдісі.
Figure 7. Result of interpolation method based on height difference between 2 and 1 series.

Интерполяция кригингом позволила построить непрерывную модель оседаний, выявив основные тенденции вертикальных смещений на полигоне. Сравнение с результатами InSAR (рис. 8) показало высокую согласованность: оба метода зафиксировали зоны активных деформаций в южной и юго-восточной частях, а также относительную стабильность северной территории без значительных вертикальных смещений.

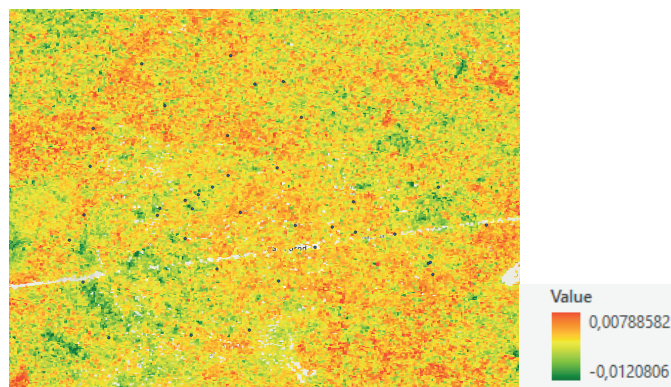


Рис. 8. Сравнительный анализ полученной поверхности с результатами InSAR.

Сурет 8. Алынған бетті InSAR нәтижелерімен салыстырмалы талдау.

Figure 8. Comparative analysis of the obtained surface with InSAR results.

Обсуждение

Проведенный пространственный анализ наблюдательной геодезической сети г. Кентау позволил выявить структурные особенности ее организации и количественно оценить эффективность покрытия территории. Результаты исследования демонстрируют выраженную пространственную неоднородность, обусловленную историческими факторами застройки и геоморфологическими особенностями местности.

Оценка плотности пунктов методом Point Density показала существенный дисбаланс между центральной и периферийной зонами. Плотность распределения D в окрестности каждой точки раstra рассчитывалась по формуле (1) как отношение количества пунктов n , попадающих в окрестность, к площади этой окрестности A :

$$D = \frac{n}{A}. \quad (1)$$

Анализ полученной карты плотности показал, что при среднем значении по полигону 0.55 пункта/км², в центральной урбанизированной части показатель превышает 0.8 пункта/км². В то же время на периферии (восточные и северо-восточные окраины) плотность снижается до критических значений – менее 0.3 пункта/км², что создает риск пропуска локальных геодинамических событий в этих зонах. Дополнительный буферный анализ подтвердил, что 90% пунктов сосредоточены в пределах 200-метровой зоны от дорожной сети, что свидетельствует об «инфраструктурном смещении» выборки.

Для верификации группировки станций был применен алгоритм DBSCAN, основанный на плотности. Формирование кластера осуществлялось при выполнении условия наличия минимального количества точек (MinPts) в радиусе ϵ , согласно условию (2). Точка p считалась корневой (core point), если:

$$|N_\epsilon(p)| \geq \text{MinPts}, \quad (2)$$

где $N_\epsilon(p) = \{q \in D | \text{dist}(q, p) \leq \epsilon\}$ – ϵ -окрестность точки p .

При эмпирически подобранных параметрах $\varepsilon = 300$ м и $MinPts = 3$ было выявлено 5 устойчивых кластеров, преимущественно в зонах жилой застройки. Также обнаружены 3 изолированных пункта (шумовые точки), не вошедших в кластерные образования, что указывает на фрагментарность сети за пределами центрального ядра.

Оценка геометрического охвата территории выполнялась посредством построения полигонов Тиссена. Границы полигонов определялись таким образом, что любая точка внутри полигона находится ближе к соответствующей станции, что формально выражается условием (3).

$$P_i = \{x \in \mathbb{R}^2 | d(x, s_i) \leq d(x, s_j), \forall j \neq i\}. \quad (3)$$

Результаты построения визуализировали значительную диспропорцию площадей полигонов. В центральной части полигоны (пункты rp_301, rp_302) имеют малую площадь и высокую степень соседства, тогда как периферийные станции (karatas, ashibulak, rudnik) характеризуются обширными зонами влияния. Это подтверждает гипотезу о снижении разрешающей способности мониторинга на окраинах города.

Для статистической оценки упорядоченности сети был рассчитан глобальный индекс Морана I. Данный показатель определяет степень кластеризации в пространстве и вычисляется по формуле (4).

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i \sum_j w_{ij} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

где N – число пунктов;

w_{ij} – пространственные веса;

x – анализируемый атрибут.

Расчетное значение индекса составило $I = 0.1413$ при -оценке 3.91 и уровне значимости $p < 0.01$. Положительное значение индекса и высокая статистическая значимость отвергают гипотезу о случайном распределении, подтверждая кластеризованный характер сети. Это свидетельствует о том, что текущая конфигурация сети сформирована не на основе регулярной сетки, а под влиянием внешних факторов (застройка, доступность).

Интеграция результатов наземных измерений и данных спутниковой радарной интерферометрии подтвердила выявленные тенденции. Сопоставление интерполяционной модели вертикальных смещений (построенной методом кригинга) с картами InSAR показало высокую сходимость ($R^2 > 0.85$) в зонах с высокой плотностью пунктов. Оба метода синхронно зафиксировали активные деформацион-

ные процессы, что обосновывает приоритетность уплотнения геодезической сети именно в этих секторах.

Заключение

Проведенное исследование пространственной структуры наблюдательной геодезической сети г. Кентау, включающей 40 пунктов на территории площадью 72 км², позволило получить следующие количественные результаты:

1. Анализ плотности выявил существенный дисбаланс в размещении станций. При среднем показателе по городу 0.55 пункта/км², в центральной части плотность превышает 0.8 пункта/км², тогда как на периферийных участках она снижается до критических значений менее 0.3 пункта/км².

2. Применение алгоритма DBSCAN (при $\varepsilon = 300$ м) позволило выделить 5 устойчивых кластеров в зонах плотной застройки и 3 изолированных пункта, что указывает на фрагментарность сети. Статистическая значимость данной группировки подтверждена расчетом глобального индекса Морана, который составил $I = 0.1413$ (z – оценка = 3.91; $p < 0.01$), что доказывает неслучайный, кластеризованный характер распределения наблюдений.

3. Буферный анализ показал высокую зависимость размещения сети от транспортных коридоров: установлено, что 90% всех пунктов расположены в пределах 200 метров от дорог с твердым покрытием, что, с одной стороны, обеспечивает доступность, но с другой – ограничивает мониторинг удаленных участков.

4. Сопоставление интерполяционной модели вертикальных смещений ГНСС с данными спутниковой интерферометрии Sentinel-1 продемонстрировало высокую сходимость результатов. Оба метода четко локализовали зоны активных деформаций, подтвердив необходимость уплотнения наземной сети именно в этих секторах.

Таким образом, доказано, что текущая конфигурация сети требует оптимизации путем добавления новых пунктов в выявленные зоны с низкой плотностью покрытия (менее 0.3 пункта/км²) для обеспечения равномерного геодинамического мониторинга всей городской агломерации.

Благодарность

Данное исследование проводилось в рамках программы BR23991563 «Создание инновационных ресурсосберегающих технологий добычи и комплексной переработки минерального и техногенного сырья», финансируемой Комитетом промышленности Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Билецца Э., Поконечны К., Борковска С. Теоретическая основа GIScience для оценки пространственного неравенства расположения геодезических пунктов // Международный журнал геоинформации ISPRS. 2020. Т. 9. № 3. С. 148 (на английском языке)
2. Айдоде И.В., Самуэль Т.А., Рут А.К. Пространственный анализ распределения контрольных пунктов в Федеральном технологическом университете Акуре // Африканский журнал политики землепользования и геопространственных наук. 2023. Т. 6. № 2. С. 339–350 (на английском языке)
3. GIS Copilot: к автономному ГИС-агенту для пространственного анализа / Акинбойева Т. [и др.] // Международный журнал цифровой Земли. 2025. Т. 18. № 1. С. 2497489 (на английском языке)

4. Овчарж К., Блаховский Й. Применение DInSAR и методов пространственной статистики в анализе поверхностных смещений // Прикладные науки. 2020. Т. 10. № 21. С. 7660 (на английском языке)
5. Мониторинг деформаций инфраструктурных сетей: полностью автоматизированная интеграция и анализ временных рядов InSAR в ГИС / Маккьяруло В. [и др.] // Мониторинг структурного состояния. 2022. Т. 21. № 4. С. 1849–1878 (на английском языке)
6. Геоинформационный анализ современных геодинамических процессов на территории г. Алматы / Жантаев Ж.Ш. [и др.] // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. 2015. Т. 6. №304. С. 28–33 (на русском языке)
7. Куропаткина Т., Любимова Т. Применение технологий ГИС для инженерного геодинамического зонирования горных территорий // E3S Web конференции. 2023. Т. 383. С. 02015 (на английском языке)
8. GNSS-визуализация вертикальных деформаций земной коры материкового Китая по данным десятилетних непрерывных GNSS-измерений / Сун С. [и др.] // Геодезия и геодинамика. 2026. Т. 17. № 1. С. 82–94 (на английском языке)
9. Мадука Р., Изве О. Инженерные возможности и устойчивость нигерийских вскрышных пород как альтернативных строительных материалов для земляных сооружений // Аравийский журнал геонаук. 2022. Т. 15. С. 767 (на английском языке)
10. Арун С., Атхира К. Интеграция ГИС и ГНСС для наблюдения Земли // Международный журнал исследований в прикладной науке и технологии инженерии. 2024. Т. 12. С. 423–425 (на английском языке)
11. Телекоммуникационные решения для создания высокоточного спутникового позиционирования на Качарском карьере / Балтиева А.А. [и др.] // Евразийская горная промышленность. 2024. № 2. С. 85–88 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Билецца Э., Поконечны К., Борковска С. Геодезиялық пункттердің орналасуындағы кеңістіктік теңсіздікті бағалау үшін GIScience теориялық негізі // ISPRS Халықаралық геоақпарат журналы. 2020. Т. 9. № 3. Б. 148 (ағылшын тілінде)
2. Айоделе И.В., Самуэль Т.А., Рут А.К. Акуре Федералды технологиялық университетіндегі бақылау пункттерінің таралуын кеңістіктік талдау // Африка жер саясаты және геокеңістіктік ғылымдар журналы. 2023. Т. 6. № 2. Б. 339–350 (ағылшын тілінде)
3. GIS Copilot: кеңістіктік талдауға арналған автономды ГИС-агенті / Акинбойева Т. [және т. б.] // Цифрлық Жердің халықаралық журналы. 2025. Т. 18. № 1. Б. 2497489 (ағылшын тілінде)
4. Овчарж К., Блаховский Й. DInSAR және кеңістіктік статистика әдістерін жер бетіндегі орын ауыстыруларды талдауда қолдану // Қолданбалы ғылымдар. 2020. Т. 10. № 21. Б. 7660 (ағылшын тілінде)
5. Инфрақұрылымдық желілердің деформацияларын мониторингілеу: InSAR уақыттық қатарларын ГИС-пен толық автоматтандырылған біріктіру және талдау / Маккьяруло В. [және т. б.] // Құрылымдық жағдайды мониторингілеу. 2022. Т. 21. № 4. Б. 1849–1878 (ағылшын тілінде)
6. Алматы қаласы аумағындағы қазіргі геодинамикалық процестердің геоақпараттық талдауы / Жантаев Ж.Ш. [және т. б.] // ҚР ҰҒА Хабарлары. Физика-математика сериясы. 2015. Т. 6. № 304. Б. 28–33 (орыс тілінде)
7. Куропаткина Т., Любимова Т. Таулы аймақтарды инженерлік геодинамикалық аймақтарға бөлу үшін ГИС технологияларын қолдану // E3S Web конференциялары. 2023. Т. 383. Б. 02015 (ағылшын тілінде)
8. Қытай материгіндегі тік қабықтық деформациялардың GNSS-бейнесі он жылдық үздіксіз GNSS-өлшеулер негізінде / Сун С. [және т. б.] // Геодезия және геодинамика. 2026. Т. 17. № 1. Б. 82–94 (ағылшын тілінде)
9. Мадука Р., Изве О. Жер жұмыстары үшін балама құрылыс материалдары ретінде нигериялық аршылған жыныстардың инженерлік мүмкіндіктері мен тұрақтылығы // Араб геология журналы. 2022. Т. 15. Б. 767 (ағылшын тілінде)
10. Арун С., Атхира К. Жерді бақылау үшін ГИС пен ГНСС интеграциясы // Қолданбалы ғылым және инженерлік технологиялар саласындағы зерттеулердің халықаралық журналы. 2024. Т. 12. Б. 423–425 (ағылшын тілінде)
11. Качар карьерінде жоғары дәлдікті спутниктік позициялауды құруға арналған телекоммуникациялық шешімдер / Балтиева А.А. [және т. б.] // Еуразиялық тау-кен өнеркәсібі. 2024. № 2. Б. 85–88 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Bieleca E., Pokonieczny K., Borkowska S. GIScience theory based assessment of spatial disparity of geodetic control points location // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. V. 9. No. 3. 148 p. (in English)

2. Ayodele I.V., Samuel T.A., Ruth A.K. Spatial analysis of control points distribution in Federal University of Technology Akure // *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*. 2023. V. 6. No. 2. 339–350 pp. (in English)
3. GIS Copilot: Towards an autonomous GIS agent for spatial analysis / Akinboyewa T. [et al.] // *International Journal of Digital Earth*. 2025. V. 18. No. 1. 2497489 p. (in English)
4. Owczarz K., Blachowski J. Application of DInSAR and spatial statistics methods in analysis of surface displacements // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. No. 21. 7660 p. (in English)
5. Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series / Macchiarulo V. [et al.] // *Structural Health Monitoring*. 2022. V. 21. No. 4. 1849–1878 pp. (in English)
6. Geoinformatsionnyi analiz sovremennykh geodinamicheskikh protsessov na territorii g. Almaty [Geoinformation analysis of modern geodynamic processes in the territory of Almaty], Zhantaev Zh.Sh. [et al.], // *Izvestiya NAN RK. Seriya fiziko-matematicheskaya*. 2015. V. 6. No. 304. 28–33 pp. (in Russian)
7. Kuropatkina T., Lyubimova T. Application of GIS technologies for engineering geodynamic zoning of mountain territories // *E3S Web of Conferences*. 2023. V. 383. 02015 p. (in English)
8. GNSS imaging of vertical crustal deformation in Chinese mainland derived from decade-long continuous GNSS measurements / Song S. [et al.] // *Geodesy and Geodynamics*. 2026. V. 17. No. 1. 82–94 (in English)
9. Maduka R., Igwe O. Engineering potentials and stability of Nigerian waste rocks as alternative construction geo-materials and Earth structure fills // *Arabian Journal of Geosciences*. 2022. V. 15. 767 p. (in English)
10. Arun S., Athira K. GIS and GNSS integration techniques for Earth observations // *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2024. V. 12. No. 7. 423–425 pp. (in English)
11. Telecommunication solutions for creating high-precision satellite positioning at Kacharsk quarry / Baltiyeva A.A. [et al.] // *Eurasian Mining*. 2024. No. 2. 85–88 pp. (in English)

Сведения об авторах:

Махметова Г.Н., мл. научн. сотрудник лаборатории «Горное давление им. А.Ч. Мусина», Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, докторант Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), makhgulgulmira@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-4689-8379>

Бимұрат Ж., научн. сотрудник лаборатории «Управление геомеханическими процессами им. акад. О.А. Байконурова», Ph.D, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева (г. Алматы, Казахстан), bimuratzhanar@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8283-898X>

Балтиева А.А., зав. лабораторией «Горное давления им. А.Ч. Мусина», Институт горного дела им. Д.А. Кунаева (г. Алматы, Казахстан), a.baltiyeva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1089-3351>

Гребби С., доцент по дистанционному зондированию Земли, Факультет инженерии, Геопространственный институт Ноттингема, Университет Ноттингема (г. Ноттингем, Великобритания), Stephen.Grebby@nottingham.ac.uk; <https://orcid.org/0000-0001-9768-2682>

Авторлар туралы мәліметтер:

Махметова Г.Н., А.Ч. Мусин атындағы тау-кен қысымы зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Д.А. Қонаев атындағы Тау-кен ісі институты, Сәтбаев Университетінің докторанты (Алматы қ., Қазақстан)

Бимұрат Ж., акад. О.А. Байқоңыров атындағы геомеханикалық процестерді басқару зертханасының ғылыми қызметкері, Ph.D, Д.А.Қонаев атындағы тау-кен институты (Алматы қ., Қазақстан)

Балтиева А.А., А.Ч. Мусин атындағы тау-кен қысымы зертханасының меңгерушісі, Д.А. Қонаев атындағы Тау-кен ісі институты (Алматы қ., Қазақстан)

Гребби С., Жерді қашықтықтан зондтау саласындағы доцент, Инженерия факультеті, Ноттингем геокеңістіктік институты, Ноттингем университеті (Ноттингем қ., Ұлыбритания)

Information about the authors:

Makhmetova G.N., Junior Researcher at the Laboratory of Mining Pressure named after A.Ch. Musin, D.A. Kunayev Mining Institute, Ph.D Candidate at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Bimurat Zh., Researcher at the Laboratory of Geomechanical Process Management named after Academician O.A. Baikonurov, Ph.D, D.A. Kunayev Mining Institute (Almaty, Kazakhstan)

Baltiyeva A.A., Head of the the Laboratory of Mining Pressure named after A.Ch. Musin, D.A. Kunayev Mining Institute (Almaty, Kazakhstan)

Grebby S., Associate Professor in Earth Observation, Faculty of Engineering, Nottingham Geospatial Institute, University of Nottingham (Nottingham, United Kingdom)