

УДК: 528.06

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-1-31-508-518

М. Д. Махмудов¹, Д. Ш. Фазилова^{2,3}, Х. Н. Магдиев^{4,5}, И. М. Эргешов⁶, Н. М. Мухторов⁷

ОЦЕНКА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РИСКА В ТАШКЕНТСКОМ РЕГИОНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ГНСС И МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

АННОТАЦИЯ

Оценка современных изменений земной поверхности и их пространственного распределения имеет ключевое значение для территориального планирования, мониторинга и управления рисками в геодинамически активных регионах. Ташкентский регион характеризуется сочетанием сложного разломного строения, высокой плотности населения и интенсивного промышленного освоения, что обуславливает необходимость комплексного анализа геодинамических процессов с использованием современных ГИС-технологий. Цель данной работы — картографирование и пространственное зонирование интенсивности современных деформационных процессов на основе данных постоянных ГНСС-станций за 2018–2024 гг. Основным методом пространственного анализа выступила сплайн-интерполяция по данным ГНСС, позволившая построить достоверное поле интенсивности деформаций и выделить ключевые зоны в пределах Ташкентского региона. В результате определены участки с максимальной интенсивностью деформаций — до 10 нано-деформаций в год ($nstrain/y$), что более чем в три раза превышает средние значения по региону (2–4 нано-деформаций в год). Наиболее высокие показатели получены в районах крупных разломов, а также в промышленных центрах (Ангрен, Алмалык), где зафиксировано до 25 землетрясений магнитудой 2,5–4,0 за последние годы. Карта зонирования была классифицирована по уровням риска, что позволило выделить районы с повышенной активностью и потенциальной опасностью для инфраструктуры и населения. Сопоставление полученных результатов с сейсмическими данными за 2018–2024 гг. подтвердило, что именно в зонах высокой интенсивности изменений наблюдается максимальная плотность сейсмических событий. Разработанные карты интегрированы в ГИС и могут быть использованы для поддержки принятия решений по управлению рисками, развитию систем мониторинга и оптимизации территориального планирования. Новизна исследования заключается в сочетании современных спутниковых данных с инструментами ГИС для комплексной количественной оценки геодинамической активности региона и построения наглядных карт для практических задач управления территорией.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГНСС, зонирование интенсивности деформаций, Ташкентский регион, пространственный анализ в ГИС, сплайн-интерполяция

¹ Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, Ташкент, Республика Узбекистан, 100052, *e-mail*: makhmudov0907@gmail.com

² Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, Ташкент, Республика Узбекистан, 100052, *e-mail*: dil_faz@yahoo.com

³ Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, ул. Университетская, д. 2, Ташкент, Республика Узбекистан, 100095, *e-mail*: dil_faz@yahoo.com

⁴ Агентство по кадастру при Министерстве экономики и финансов Республики Узбекистан, ул. Чупоната, д. 6В, Ташкент, Республика Узбекистан, 100097, *e-mail*: hasan.magdiev@gmail.com

⁵ Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, Ташкент, Республика Узбекистан, 100052, *e-mail*: hasan.magdiev@gmail.com

⁶ Агентство по кадастру при Министерстве экономики и финансов Республики Узбекистан, ул. Чупоната, д. 6В, Ташкент, Республика Узбекистан, 100097, *e-mail*: ergeshovikhtiyar75@gmail.com

⁷ Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, Ташкент, Республика Узбекистан, 100052, *e-mail*: mnurmukhammad@gmail.com

Mirshodjon D. Makhmudov¹, Dilbarkhon Sh. Fazilova^{2,3}, Khasan N. Magdiev^{4,5},
Ikhtiyar M. Ergeshov⁶, Nurmukhammad M. Mukhtorov⁷

ASSESSMENT OF GEODYNAMIC RISK IN THE TASHKENT REGION USING GNSS DATA AND SPATIAL ANALYSIS METHODS

ABSTRACT

The assessment of contemporary surface deformations and their spatial distribution is crucial for territorial planning, monitoring, and risk management in geodynamically active regions. The Tashkent Region is characterized by a combination of complex fault structures, high population density, and intensive industrial development, which determines the necessity of a comprehensive analysis of geodynamic processes using modern GIS technologies. This study aimed to map and spatially zone the intensity of contemporary deformation processes using continuous GNSS station data from 2018 to 2024. Spline interpolation based on GNSS data was applied as the main spatial analysis method, enabling the construction of a reliable deformation intensity field and the identification of key zones within the Tashkent Region. As a result, areas with maximum deformation intensities of up to 10 nanostrains per year (nstrain/y) were identified, which is more than three times the regional average (2–4 nstrain/y). The highest values were observed along major fault zones as well as in industrial centers (Angren, Almalyk), where up to 25 earthquakes with magnitudes of 2.5–4.0 were recorded in recent years. The zoning map was classified by risk levels, allowing for the identification of areas with increased geodynamic activity and potential threats to infrastructure and the population. Comparison with seismic data for 2018–2024 confirmed that the areas with high deformation intensity also correspond to zones with the highest density of seismic events. The resulting maps were integrated into a GIS environment and can support decision-making in risk management, monitoring system development, and territorial planning. The novelty of this study lies in the integration of modern satellite-based GNSS data with GIS tools to provide a comprehensive quantitative assessment of regional geodynamic activity and to produce informative maps for practical territorial management.

KEYWORDS: GNSS, deformation intensity zoning, Tashkent Region, GIS spatial analysis, spline interpolation

ВВЕДЕНИЕ

Изучение пространственного распределения геодинамических рисков с применением современных ГИС-технологий становится неотъемлемой частью территориального планирования и устойчивого развития регионов, особенно в условиях роста техногенной нагрузки и сейсмической опасности [Кузьмин, 2017; Атабеков, Садыков, 2022]. За послед-

¹ Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbekistan Academy of Sciences, 33, Astronomicheskaya str., Tashkent, 100052, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: makhmudov0907@gmail.com

² Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbekistan Academy of Sciences, 33, Astronomicheskaya str., Tashkent, 100052, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: dil_faz@yahoo.com

³ Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov, 2, Universitetskaya str., Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: dil_faz@yahoo.com

⁴ Cadaster agency under Economy and Financial Ministry of Republic Uzbekistan, 6V, Chuponata str., Tashkent, 100097, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: hasan.magdiev@gmail.com

⁵ Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbekistan Academy of Sciences, 33, Astronomicheskaya str., Tashkent, 100052, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: hasan.magdiev@gmail.com

⁶ Cadaster Agency under Economy and Financial Ministry of Republic Uzbekistan, 6V, Chuponata str., Tashkent, 100097, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: ergeshovikhtiyar75@gmail.com

⁷ Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbekistan Academy of Sciences, 33, Astronomicheskaya str., Tashkent, 100052, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: mnurmukhammad@gmail.com

ние два десятилетия методы спутниковой геодезии, в первую очередь на основе данных глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), заняли центральное место в системе мониторинга и анализа деформационных процессов [Hao et al., 2019; Rahmadani et al., 2022; Araszkievicz, 2023; Hussain et al., 2023; Thammaboribal et al., 2024]. Использование ГИС-платформ и средств пространственного анализа позволяет интегрировать спутниковые данные, карты разломов и инфраструктурные объекты для комплексной оценки геодинамического риска и создания актуальных карт опасности [Балдина и др., 2022; Banica et al., 2017; Bahadir et al., 2024].

Ташкентский регион — один из наиболее геодинамически активных и экономически значимых районов Центральной Азии. Здесь сочетаются сложное строение земной коры, развитая сеть активных разломов (Каржантауский, Кумбель-Кокандский, Чаткальский), высокая плотность населения и масштабное промышленное освоение. По результатам ГНСС-наблюдений за 2018–2023 гг., горизонтальные скорости смещений в регионе варьируются от 1,5 до 20,3 мм/год, а в районе Алмалыка достигают 14 мм/год; на северо-востоке преобладают подъемы поверхности, тогда как на западе, в зоне техногенного воздействия, доминирует просадка до 17 мм/год [Fazilova et al., 2023; 2025]. Применение алгоритма связанной интерполяции двумерных векторных данных позволило построить детальные карты смещений и выделить зоны риска, включая локальные деформации, обусловленные как тектоническими, так и антропогенными факторами, особенно в районах Ангрэн – Алмалык [Махмудов, Фазилова, 2023].

Современные ГИС-подходы позволяют не только моделировать поля скоростей, дилатации (растяжения/сжатия) и сдвиговой деформации (shear strain), но и проводить зонирование территории по уровням геодинамического риска. Особое значение придается визуализации и построению карт направлений современных движений, по которым можно определить наиболее опасные участки для инфраструктуры и населения. Интеграция полученных карт с социально-экономическими и инфраструктурными слоями в ГИС обеспечивает их практическую ценность для мониторинга, территориального планирования, устойчивого развития и управления рисками. Целью настоящей работы является проведение геоинформационного анализа геодинамического риска в Ташкентском регионе на основе данных постоянных ГНСС-станций за 2018–2024 гг., построение карт зон риска и обоснование их применения для поддержки систем мониторинга и пространственного управления регионом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ташкентский регион расположен в пределах Западного Тянь-Шаня — одного из наиболее геодинамически активных районов Центральной Азии. Территория характеризуется сложной сетью разломов (Каржантауский, Кумбель-Кокандский, Северо-Ферганский) и интенсивной антропогенной нагрузкой, особенно в районах крупных промышленных центров Ангрэн и Алмалык [Bande, 2016; Brunet et al., 2017]. Регион входит в состав Ташкентской сейсмической зоны, где средний период повторяемости сильных землетрясений составляет около 12–15 лет [Мавлянова и др., 2021]. В пределах данной зоны зафиксированы эпицентры нескольких крупных землетрясений XX в., включая Ташкентское (1966 г.), Таваксанское (1977 г.) и Назарбекское (1980 г.). Повышенная сейсмическая активность зафиксирована также в юго-восточной части региона, о чем свидетельствуют данные последних землетрясений. Наиболее заметны эти проявления в районе городов Ангрэн и Алмалык — промышленной зоны, где в последние годы активно развиваются горнодобывающие и перерабатывающие предприятия. Такие условия обуславливают необходимость комплексного пространственного мониторинга для целей управления рисками и территориального планирования.

В работе использовались временные ряды координат с 15 постоянных ГНСС-станций, функционирующих на территории региона с 2018 по 2024 гг. В анализ включены международные станции (TASH, MTAL — проекты IGS¹, CAWa²) и национальные пункты геодезической сети. Фиксация координат велась с интервалом 30 с, обеспечивая высокую точность определения скоростей (рис. 1).

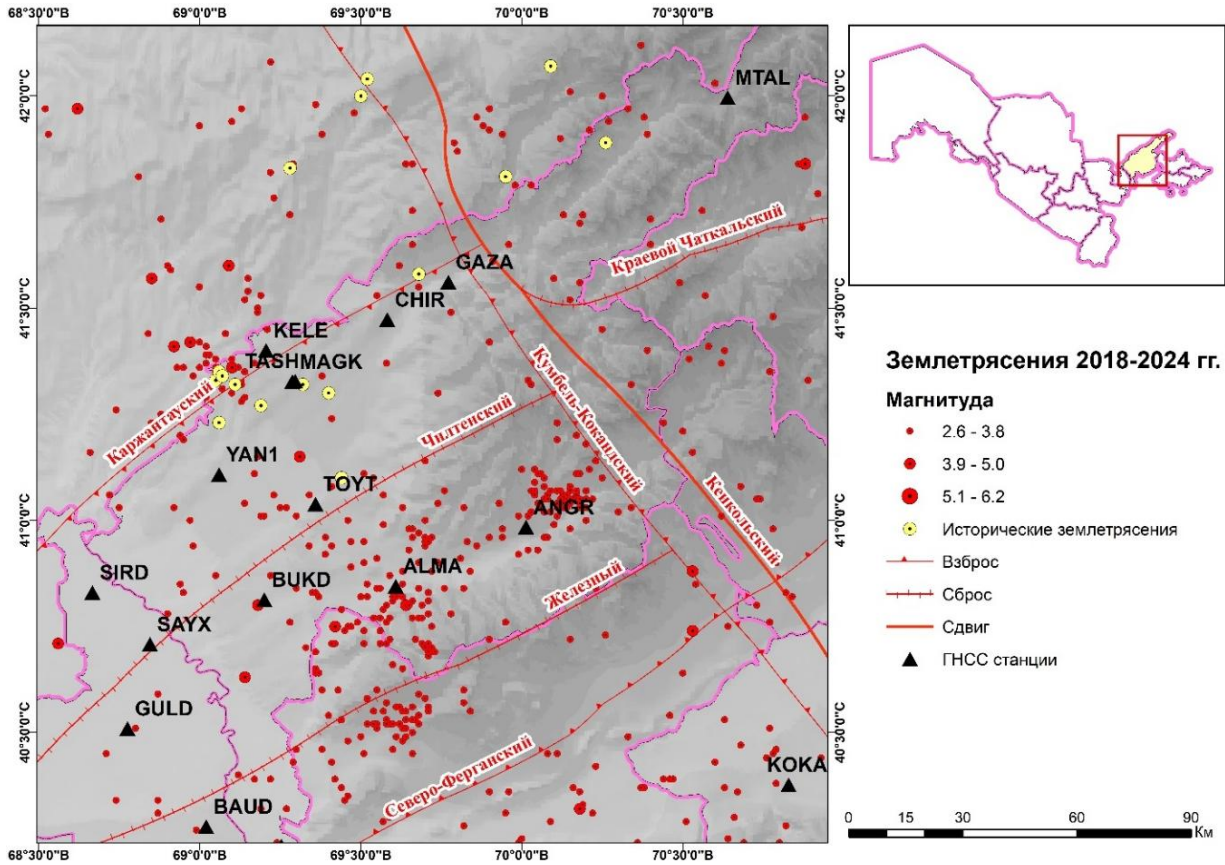


Рис. 1. Карта исследуемой области: сейсмические события 2018–2024 гг.³, активные тектонические разломы [Цай, 2019] и сеть ГНСС-пунктов
Fig. 1. The study region with earthquake events (2018–2024)⁴, active tectonic faults [Tsay, 2019], and GNSS observation sites

Первичная обработка ГНСС-наблюдений выполнялась с использованием программного комплекса GAMIT/GLOBK (v. 10.71) [Herring et al., 2018], с применением международных стандартов и модели вращения Евразийской плиты [Dong et al., 1998; IERS, 2010; Altamimi et al., 2016]. По данным ГНСС-станций с использованием метода интерполяции Шена [Shen, Jackson, 1996; Shen et al., 2015] и расчетной схемы [Zhao et al., 2023] построена карта распределения интенсивности современных деформаций (shear strain).

¹ International GNSS Service (IGS). Электронный ресурс: <https://igs.org/> (дата обращения 07.01.2025)
² Central Asian Water (CAWa) project. Электронный ресурс: <https://www.cawa-project.net/> (дата обращения 07.01.2025)
³ Республиканский центр сейсмопрогностического мониторинга. Электронный ресурс: <https://smrm.educlub.uz/earthquakes/compilation> (дата обращения 07.01.2025)
⁴ Republican Center for Seismic Forecasting Monitoring. Web resource: <https://smrm.educlub.uz/earthquakes/compilation> (accessed 07.01.2025)

Для построения непрерывного поля максимальных деформаций (shear strain) на территории исследования был применен метод сплайн-интерполяции в среде ArcGIS Pro v. 10.8¹. Данный подход позволяет по точечным значениям, полученным с ГНСС-станций, вычислить значения интенсивности деформации (shear strain) для каждой ячейки регулярной сетки, что обеспечивает визуализацию пространственного распределения деформационной активности по всей территории [Alavi et al., 2024; Hervas et al., 2025]. В настройках инструмента был выбран тип сплайна «REGULARIZED», который обеспечивает минимизацию кривизны поверхности и сглаживание локальных аномалий. Величина веса сглаживания установлена на уровне 0,1 — данный параметр влияет на степень сглаживания и определяет вес третьих производных при минимизации кривизны. Для интерполяции значения в каждой ячейке учитывалось 12 ближайших точек исходных данных. Применение сплайн-интерполяции позволило получить детальную и плавную картину распределения деформационной активности, что обеспечило качественную основу для последующей классификации и визуализации зон геодинамического риска. С целью повышения надежности пространственной модели и минимизации искажений в краевых зонах, при построении интерполяционного поля были использованы также данные с опорных пунктов, расположенных за пределами основной зоны анализа (т. н. КОКА). Такой подход позволил обеспечить корректную геометрию интерполяционного расчета в пределах Ташкентского региона без выхода за границы реальных наблюдений. При этом результаты визуализируются и интерпретируются строго в пределах административной территории региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена карта распределения интенсивности современных деформационных процессов по данным ГНСС-наблюдений за 2018–2024 гг. Основная часть территории характеризуется фоновыми значениями в пределах 2–4 нано-деформаций в год (nstrain/y). Максимальные значения зафиксированы в северо-восточной части региона — в районе Каржантауского разлома, а также вдоль Кумбель-Кокандского и Северо-Ферганского разломов, где интенсивность достигает 7–10 нано-деформаций в год, что значительно превышает фоновые уровни. Переходы между зонами различной интенсивности деформаций на карте в значительной степени повторяют направление разломов, особенно в районах Каржантауского, Чилтенского и Кумбель-Кокандского разломов. Это свидетельствует о тесной связи наблюдаемых современных процессов с геологическим строением территории. В центральной части региона (районы Алмалыка — ALMA и Ангрена — ANGR), а также в окрестностях пересечения крупных разломов, отмечаются локальные максимумы интенсивности деформаций: значения достигают здесь до 8 нано-деформаций в год, что значительно превышает средний уровень по региону. В этих участках, по данным о землетрясениях (рис. 1), за период 2018–2024 гг. зафиксировано до 20–25 событий с магнитудой 2,5–4,0, что свидетельствует о высокой плотности сейсмических проявлений. Такое сочетание значительных современных деформаций земной поверхности и учащенных слабых землетрясений подчеркивает динамичность этих территорий и необходимость их приоритетного включения в системы мониторинга и территориального планирования.

Результаты пространственного анализа показывают, что главные области, где происходят наиболее заметные современные движения земной поверхности, соответствуют крупным геологическим линиям региона. Интеграция данных спутниковых измерений с наблюдениями по землетрясениям позволяет выделить участки, которые требуют особого

¹ Как работает инструмент Сплайн. Электронный ресурс: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm> (дата обращения 05.03.2025)

внимания в плане наблюдения за рисками природного и техногенного характера. Построенные карты могут стать инструментом для специалистов по управлению территорией, т. к. помогают определять зоны, где наиболее вероятны процессы, влияющие на безопасность инфраструктуры и населения. Такой подход облегчает принятие решений по мониторингу, профилактике и планированию устойчивого развития Ташкентского региона.

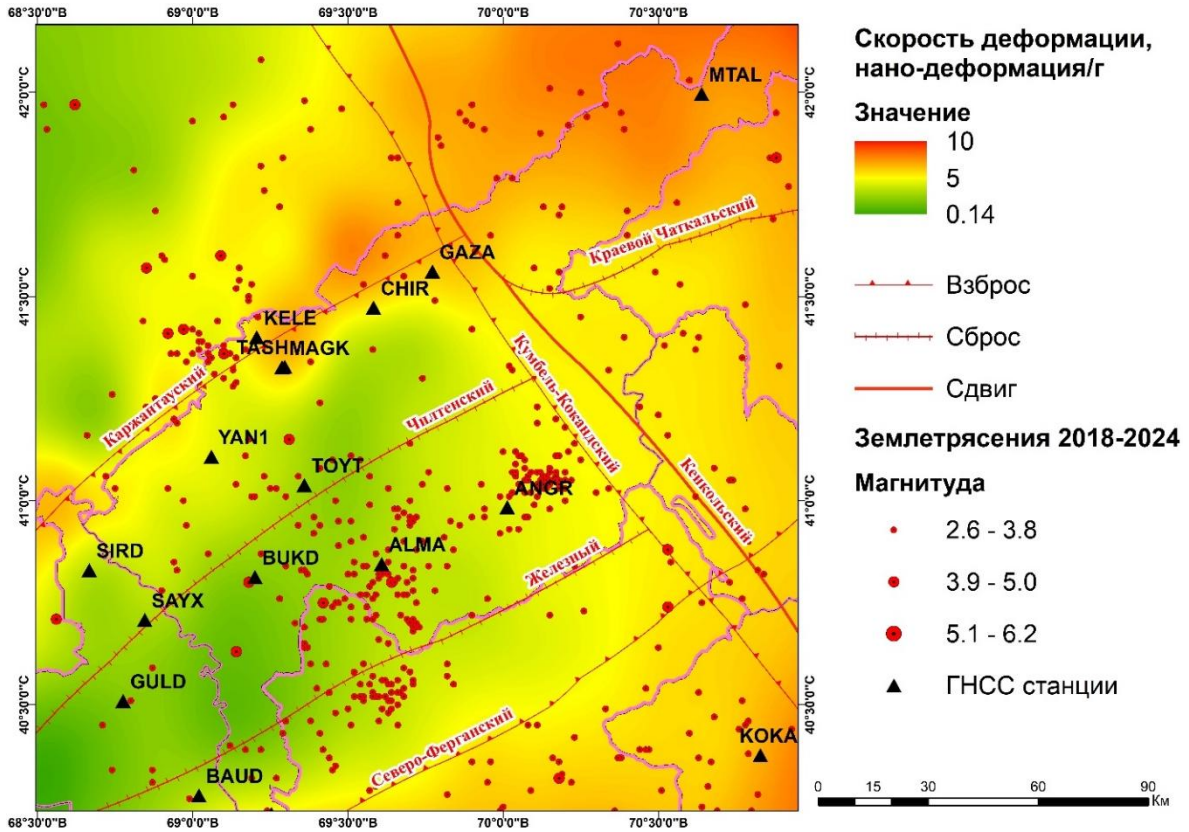


Рис. 2. Поле максимальных скоростей деформаций (нано-деформаций в год) в Ташкентском регионе по данным ГНСС (2018–2024 гг.)
Fig. 2. Field of maximum deformation rates (nstrain/y) in the Tashkent Region based on GNSS data (2018–2024)

Применение метода сплайн-интерполяции для анализа интенсивности современных деформаций на территории Ташкентского региона позволило получить наглядную и информативную карту распределения деформационных процессов. Этот метод обеспечил плавное и непрерывное отображение современных деформаций земной поверхности между точками ГНСС-наблюдений, что значительно облегчает выделение зон с повышенной активностью и их интеграцию в системы территориального планирования и мониторинга. В условиях сложного геологического строения и неравномерного размещения пунктов ГНСС именно сплайн-интерполяция позволила минимизировать влияние случайных выбросов и локальных аномалий, а также сгладить эффект «шагов» между отдельными участками. Полученная поверхность хорошо выявила крупные области интенсивных изменений — в т. ч. вдоль Каржантауского, Кумбель-Кокандского и Северо-Ферганского разломов, а также в промышленных районах Алмалыка и Ангрена. Вместе с тем, для нашего случая проявились и некоторые ограничения метода. В районах, удаленных от ГНСС-станций или с низкой плотностью наблюдений (северо-восточная часть региона), сплайн-интерполяция может чрезмерно сглаживать поверхность, приводя к недооценке реальных

локальных экстремумов деформаций. Кроме того, в некоторых случаях метод может создавать «артефакты» — области неестественно высоких или низких значений вне зон плотных наблюдений. Это требует осторожности при интерпретации результатов и подчеркивает важность совместного анализа с данными сейсмических событий и геологической информации. В целом, применение сплайн-интерполяции дало нам возможность картографически визуализировать основные тенденции деформационных процессов в регионе, но для уточнения локальных особенностей и выявления узких зон риска целесообразно использовать комбинированный подход с привлечением других методов пространственного анализа и дополнительной информации.

ВЫВОДЫ

В ходе работы проведен комплексный геоинформационный анализ интенсивности современных деформационных процессов в Ташкентском регионе на основе данных постоянных ГНСС-станций за 2018–2024 гг. Применение метода сплайн-интерполяции позволило построить наглядные карты распределения интенсивности деформаций, выявить зоны с максимальными значениями современных деформаций земной поверхности, выявленных по данным ГНСС, и осуществить классификацию территории по уровням потенциального риска.

Особое внимание уделено сопоставлению полученных результатов с положением основных разломов и данными о сейсмических событиях, что позволило подтвердить тесную связь современных деформационных процессов с геологическим строением региона и выявить участки, где наблюдаются как повышенная активность земной поверхности, так и скопления слабых землетрясений. Полученные карты, интегрированные в ГИС, обладают практической ценностью для мониторинга, территориального планирования и принятия управленческих решений в области снижения природных и техногенных рисков.

Новизна работы заключается в использовании современных спутниковых технологий и ГИС-инструментов для пространственного зонирования интенсивности деформационных процессов на примере реальной территории с учетом промышленной нагрузки и сложного строения разломов. Впервые для данного региона детально реализовано сочетание данных ГНСС-мониторинга и методов ГИС-визуализации, что позволило повысить точность локализации зон риска и предложить эффективные решения для задач комплексного управления безопасностью территории.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование выполнено в рамках проекта № FL-8824063217 при финансовой поддержке Агентства инновационного развития при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан. Авторы также выражают искреннюю благодарность анонимным рецензентам за конструктивные замечания и ценные рекомендации, способствовавшие улучшению качества работы.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was carried out within the framework of Project No. FL-8824063217, funded by the Agency for Innovative Development under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan. The authors would also like to express their sincere gratitude to the anonymous reviewers for their constructive comments and valuable suggestions, which helped to improve the quality of this work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атабеков И. У., Садыков Ю. М.* Напряженное состояние земной коры западного Тянь-Шаня в Центральной Азии (Узбекистан): математическое моделирование. Геотектоника, 2022. № 3. С. 50–65.
- Балдина Е. А., Лебедева Е. В., Медведев А. А.* Методика дешифрирования архивных и современных космических снимков для изучения динамики склоновых процессов в долине р. Гейзерная (Камчатка). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Международной конференции, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 266–283. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283.
- Кузьмин Ю. О.* Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике. Физика Земли, 2017. № 6. С. 24–39. DOI: 10.7868/S0002333717060023.
- Мавлянова Н. Г., Ибрагимов Р. С., Ибрагимова Т. Л., Рахматуллаев Х. Х.* Особенности сейсмогравитационных процессов в зонах активного проявления землетрясений Центральной Азии (на примере территории Узбекистана). Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2021. № 2. С. 27–40. DOI: 10.31857/S0869780921020053.
- Махмудов М. Д., Фазилова Д. Ш.* Построение регулярного поля скоростей Ташкентского региона на основе интерполяции данных ГНСС пунктов. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы международной конференции. М.: МГУ, Географический факультет, 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 535–545. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-535-545.
- Цай О. Г.* Электронная карта разломов Срединного, Южного Тянь-Шаня и прилегающих территорий. Материалы ЛП Тектонического совещания «Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики», 2019. Т. 2. С. 382–386. Электронный ресурс: <http://www.ginra.s.ru/materials/files/MTS-2020-2%20.pdf> (дата обращения 01.10.2024).
- Alavi S. H., Bahrami A., Mashayekhi M., Zolfaghari M.* Optimizing Interpolation Methods and Point Distances for Accurate Earthquake Hazard Mapping. Buildings, 2024. V. 14. No. 6. Art. 1823. DOI: 10.3390/buildings14061823.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.* ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016. V. 121. No. 8. P. 6109–6131. DOI: 10.1002/2016jb013098.
- Araszkievicz A.* Integration of Distributed Dense Polish GNSS Data for Monitoring the Low Deformation Rates of Earth's Crust. Remote Sensing, 2023. V. 15. Art. 1504. DOI: 10.3390/rs15061504.
- Bahadır M., Ocak F., Şen H.* Determination of the Development of Settlements Above Earthquake Susceptibility Classes in Atakum District (Samsun/Türkiye). International Journal of Engineering and Geosciences, 2024. V. 9. No. 3. P. 390–405. DOI: 10.26833/ijeg.1465072.
- Bande A. E.* The Tectonic Evolution of the Western Tien Shan, Potsdam, August 2016. Web resource: <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-398933> (accessed 01.07.2024)
- Banica A., Rosu L., Muntele I., Grozavu A.* Towards Urban Resilience: A Multi-Criteria Analysis of Seismic Vulnerability in Iasi City (Romania). Sustainability, 2017. V. 9. No. 2. Art. 270. DOI: 10.3390/su9020270.
- Brunet M.-F., McCann T., Sobel E. R.* Geological Evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range. London: Geological Society, 2017. DOI: 10.1144/SP427.
- Dong D., Herring T. A., King R. W.* Estimating Regional Deformation from a Combination of Space and Terrestrial Geodetic Data. Journal of Geodesy, 1998. V. 72. P. 200–214. DOI: 10.1007/s001900050161.

- Fazilova D., Makhmudov M., Khalimov B.* The Analysis of Crustal Deformation Patterns in the Tashkent Region, Uzbekistan, Derived from GNSS Data Over the Period 2018–2023. *Geodesy and Geodynamics*, 2025. V. 16. No. 2. P. 137–146. DOI: 10.1016/j.geog.2024.07.001.
- Fazilova D., Makhmudov M., Magdiev K.* Analysis of Crustal Movements in the Angren-Almalyk Mining Industrial Area Using GNSS Data. *International Journal of Geoinformatics*, 2023. V. 19. No. 11. P. 12–19. DOI: 10.52939/ijg.v19i11.2915.
- Hao M., Li Y., Zhuang W.* Crustal Movement and Strain Distribution in East Asia Revealed by GPS Observations. *Scientific Reports*, 2019. V. 9. Art. 16797. DOI: 10.1038/s41598-019-53306-y.
- Herring T. A., King R. W., Floyd M., McClusky S. C.* Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. Web resource: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (accessed 10.09.2022).
- Hervas D., Carracedo P., Franco G.* Spatial Interpolation Model with Covariates Using Thin Plate Splines. *Decision Sciences. DSA ISC 2024. Lecture Notes in Computer Science*, 2025. V. 14778. DOI:10.1007/978-3-031-78238-1_25.
- Hussain E., Gunawan E., Hanifa N. R., Zahro Q.* The Seismic Hazard from the Lembang Fault, Indonesia, Derived from InSAR and GNSS Data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2023. V. 23. No. 10. P. 3185–3197. DOI: 10.5194/nhess-23-3185-2023.
- IERS Conventions. IERS Technical Note 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
- Rahmadani S., Meilano I., Susilo S., Sarsito D. A., Abidin H. Z., Supendi P.* Geodetic Observation of Strain Accumulation in the Banda Arc Region. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022. V. 13. No. 1. P. 2579–2596. DOI: 10.1080/19475705.2022.2126799.
- Shen Z. K., Jackson D. D.* Crustal Deformation Across and Beyond the Los Angeles Basin from Geodetic Measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996. V. 101. P. 27957–27980. DOI: 10.1029/96JB02544.
- Shen Z. K., Wang M., Zeng Y., Wang F.* Optimal Interpolation of Spatially Discretized Geodetic Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015. V. 105. No. 4. P. 2117–2127. DOI: 10.1785/0120140247.
- Thammaboribal P., Tripathi N. K., Lipiloet S.* Pre-Seismic Signature Detection using Diurnal GPS-TEC and Kriging Interpolation Maps (ASK-VTEC Technique): 11 May 2011, M9.0 Tohoku Earthquake Case Study. *International Journal of Geoinformatics*, 2024. V. 20. No. 11. P. 148–161. DOI: 10.52939/ijg.v20i11.3715.
- Zhao Q., Ding K., Lan G., Wu Y., Liu Y., Peng S., Li T.* Spatiotemporal Characteristics of Horizontal Crustal Deformation in the Sichuan-Yunnan Region Using GPS Data. *Remote Sensing*, 2023. V. 15. Art. 4724. DOI: 10.3390/rs15194724.

REFERENCES

- Alavi S. H., Bahrami A., Mashayekhi M., Zolfaghari M.* Optimizing Interpolation Methods and Point Distances for Accurate Earthquake Hazard Mapping. *Buildings*, 2024. V. 14. No. 6. Art. 1823. DOI: 10.3390/buildings14061823.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.* ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016. V. 121. No. 8. P. 6109–6131. DOI: 10.1002/2016jb013098.

- Araszkiewicz A.* Integration of Distributed Dense Polish GNSS Data for Monitoring the Low Deformation Rates of Earth's Crust. *Remote Sensing*, 2023. V. 15. Art. 1504. DOI: 10.3390/rs15061504.
- Atabekov I. U., Sadikov Yu. M.* Stress State of the Earth's Crust in the Western Tien Shan in Central Asia (Uzbekistan): A Mathematical Stress Model. *Geotectonics*, 2022. No. 3. P. 50–65 (in Russian).
- Bahadır M., Ocak F., Şen H.* Determination of the Development of Settlements Above Earthquake Susceptibility Classes in Atakum District (Samsun/Türkiye). *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2024. V. 9. No. 3. P. 390–405. DOI: 10.26833/ijeg.1465072.
- Baldina E. A., Lebedeva E. V., Medvedev A. A.* Technique for Interpretation of Archive and Recent Satellite Images to Study the Slope Processes Dynamics in the Geyzernaya River Valley (Kamchatka). *InterCarto. InterGIS. Proceedings of International Conference*, 2022. V. 28. Part 1. P. 266–283 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283.
- Bande A. E.* The Tectonic Evolution of the Western Tien Shan, Potsdam, August 2016. Web resource: <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-398933> (accessed 01.07.2024)
- Banica A., Rosu L., Muntele I., Grozavu A.* Towards Urban Resilience: A Multi-Criteria Analysis of Seismic Vulnerability in Iasi City (Romania). *Sustainability*, 2017. V. 9. No. 2. Art. 270. DOI: 10.3390/su9020270.
- Brunet M.-F., McCann T., Sobel E. R.* Geological Evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range. London: Geological Society, 2017. DOI: 10.1144/SP427.
- Dong D., Herring T. A., King R. W.* Estimating Regional Deformation from a Combination of Space and Terrestrial Geodetic Data. *Journal of Geodesy*, 1998. V. 72. P. 200–214. DOI: 10.1007/s001900050161.
- Fazilova D., Makhmudov M., Khalimov B.* The Analysis of Crustal Deformation Patterns in the Tashkent Region, Uzbekistan, Derived from GNSS Data Over the Period 2018–2023. *Geodesy and Geodynamics*, 2025. V. 16. No. 2. P. 137–146. DOI: 10.1016/j.geog.2024.07.001.
- Fazilova D., Makhmudov M., Magdiev K.* Analysis of Crustal Movements in the Angren-Almalyk Mining Industrial Area Using GNSS Data. *International Journal of Geoinformatics*, 2023. V. 19. No. 11. P. 12–19. DOI: 10.52939/ijg.v19i11.2915.
- Hao M., Li Y., Zhuang W.* Crustal Movement and Strain Distribution in East Asia Revealed by GPS Observations. *Scientific Reports*, 2019. V. 9. Art. 16797. DOI: 10.1038/s41598-019-53306-y.
- Herring T. A., King R. W., Floyd M., McClusky S. C.* Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. Web resource: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (accessed 10.09.2022).
- Hervas D., Carracedo P., Franco G.* Spatial Interpolation Model with Covariates Using Thin Plate Splines. *Decision Sciences. DSA ISC 2024. Lecture Notes in Computer Science*, 2025. V. 14778. DOI:10.1007/978-3-031-78238-1_25.
- Hussain E., Gunawan E., Hanifa N. R., Zahro Q.* The Seismic Hazard from the Lembang Fault, Indonesia, Derived from InSAR and GNSS Data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2023. V. 23. No. 10. P. 3185–3197. DOI: 10.5194/nhess-23-3185-2023.
- IERS Conventions. IERS Technical Note 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
- Kuzmin Yu. O.* Paradoxes of Comparative Analysis of Measurements by Methods of Ground and Satellite Geodesy in Modern Geodynamics. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2017. No. 6. P. 24–39 (in Russian). DOI: 10.7868/S0002333717060023.

Makhmudov M. D., Fazilova D. Sh. Construction the Velocity Field in a Regular Grid in the Tashkent Region on the Basis Interpolation of GNSS Permanent Stations Data. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Scientific Conference. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 1. P. 535–545 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-535-545.

Mavlyanova N. G., Ibragimov R. S., Ibragimova T. L., Rakhmatullaev K. K. Features of Seismo-gravitational Processes in Zones of Active Earthquake Manifestation in Central Asia (A Case Study of Uzbekistan). Environmental Geoscience, 2021. No. 2. P. 27–40 (in Russian). DOI: 10.31857/S0869780921020053.

Rahmadani S., Meilano I., Susilo S., Sarsito D. A., Abidin H. Z., Supendi P. Geodetic Observation of Strain Accumulation in the Banda Arc Region. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2022. V. 13. No. 1. P. 2579–2596. DOI: 10.1080/19475705.2022.2126799.

Shen Z. K., Jackson D. D. Crustal Deformation Across and Beyond the Los Angeles Basin from Geodetic Measurements. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996. V. 101. P. 27957–27980. DOI: 10.1029/96JB02544.

Shen Z. K., Wang M., Zeng Y., Wang F. Optimal Interpolation of Spatially Discretized Geodetic Data. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015. V. 105. No. 4. P. 2117–2127. DOI: 10.1785/0120140247.

Thammaboribal P., Tripathi N. K., Lipiloet S. Pre-Seismic Signature Detection using Diurnal GPS-TEC and Kriging Interpolation Maps (ASK-VTEC Technique): 11 May 2011, M9.0 Tohoku Earthquake Case Study. International Journal of Geoinformatics, 2024. V. 20. No. 11. P. 148–161. DOI: 10.52939/ijg.v20i11.3715.

Tsay O. G. Electronic Map of Faults of the Middle, Southern Tien Shan and Adjacent Territories. Proceedings of the LII Tectonic Meeting “Fundamental Problems of Tectonics and Geodynamics”, 2019. V. 2. P. 382–386. Web resource: <http://www.ginras.ru/materials/files/MTS-2020-2%20.pdf> (accessed 01.10.2024) (in Russian).

Zhao Q., Ding K., Lan G., Wu Y., Liu Y., Peng S., Li T. Spatiotemporal Characteristics of Horizontal Crustal Deformation in the Sichuan-Yunnan Region Using GPS Data. Remote Sensing, 2023. V. 15. Art. 4724. DOI: 10.3390/rs15194724.