Жумаев Маъмур Норбута угли
“AD EXPRESS INVEST STROY” MCHJ,
Самаарканд, Узбекистан

ИНТЕГРАЦИЯ GNSS И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация: На данный момент одной из важнейших задач современной геодезии является наблюдение за земной поверхностью. Отдельные методы наблюдений имеют ряд различных ограничений: спутниковые навигационные наблюдения (GNSS) обеспечивают высокоточные измерения смещений, однако являются точечными. Методы дистанционного зондирования позволяют получать пространственно непрерывную информацию, но обладают рядом недостатков, связанных с влиянием погодных условий, перегревом оборудования и другими факторами.

В данной работе рассматривается вариант интеграции данных GNSS и дистанционного зондирования для мониторинга земной поверхности. GNSS используется для получения временных рядов координат и оценки векторных смещений в отдельных пунктах, а данные интерферометрической радиолокационной съёмки (InSAR) для построения пространственных карт исследуемой территории. Совместное использование этих данных позволяет повысить достоверность результатов и обеспечить взаимную валидацию измерений.

Ключевые слова: *GNSS; InSAR; мониторинг ; дистанционное зондирование; геодезические измерения; интеграция данных.*

Ma’mur Norbuta ugli Jumayev
“AD EXPRESS INVEST STROY” LLC
Samarkand, Uzbekistan

INTEGRATION OF GNSS AND REMOTE SENSING FOR MONITORING THE EARTH’S SURFACE

Abstract: Monitoring of the Earth's surface is currently one of the most important tasks in modern Geodesy. Individual observation methods have a number of limitations. Satellite navigation observations based on Global Navigation Satellite System (GNSS) provide highly accurate displacement measurements but are limited to point observations. In contrast, Remote Sensing methods allow obtaining spatially continuous information; however, their results may be affected by atmospheric conditions, equipment limitations, and other

external factors.

This study considers an approach to integrating GNSS and remote sensing data for monitoring surface deformations. GNSS observations are used to obtain coordinate time series and estimate displacement vectors at individual observation points, while data from Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) are used to construct spatial deformation maps of the study area. The combined use of these data improves the reliability of the results and enables cross-validation of measurements.

Keywords: *GNSS; InSAR; deformation monitoring; remote sensing; geodetic measurements; data integration.*

Введение

Мониторинг земной поверхности является одной из важнейших задач современной Geodesy. Деформационные процессы могут возникать как под воздействием природных факторов (сейсмическая активность, геодинамические процессы, оползни), так и в результате антропогенной деятельности человека, включая интенсивную урбанизацию, строительство инженерных сооружений и развитие горнодобывающей промышленности. Своевременное выявление и анализ позволяют снизить риски возникновения чрезвычайных ситуаций и обеспечить безопасность инфраструктуры и населения.

В настоящее время для наблюдения за деформациями широко применяются спутниковые геодезические методы, в частности технологии Global Navigation Satellite System. Использование GNSS обеспечивает получение высокоточных трёхмерных координат пунктов наблюдений и позволяет формировать временные ряды смещений с миллиметровой точностью. Однако данный метод имеет ряд ограничений, включая зависимость от качества спутникового сигнала, высокую стоимость оборудования и уязвимость к радиопомехам [1, 2].

Наряду с GNSS активно используются методы Remote Sensing, в частности радиолокационная интерферометрия Interferometric Synthetic Aperture Radar. Данный подход позволяет получать пространственную информацию о смещениях земной поверхности на региональном и локальном уровнях, а также анализировать деформационные процессы на больших территориях. Вместе с тем результаты обработки радиолокационных данных могут быть подвержены влиянию атмосферных эффектов, особенностей геометрии съёмки и временной декорреляции сигнала, что может снижать точность получаемых результатов при отсутствии наземных измерений.

В связи с указанными ограничениями отдельных методов возрастает

интерес к интеграции данных GNSS-наблюдений и спутниковых методов дистанционного зондирования. Совместное использование этих подходов позволяет объединить высокую точность точечных GNSS-измерений с пространственной информативностью радиолокационных данных. GNSS-наблюдения могут использоваться для калибровки и контроля точности спутниковых измерений, тогда как данные дистанционного зондирования обеспечивают детальное пространственное представление деформационных процессов.

Таким образом, интеграция GNSS и данных дистанционного зондирования представляет собой перспективное направление развития современных методов мониторинга земной поверхности. Исследование возможностей и эффективности такого подхода является актуальной научно-практической задачей.

Актуальность темы исследования

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности мониторинга земной поверхности, возникающих под воздействием природных и антропогенных факторов, таких как урбанизация территорий, строительство инженерных сооружений и развитие горнодобывающей промышленности [3-5]. Деформационные процессы могут представлять потенциальную угрозу для устойчивости сооружений, транспортной инфраструктуры и безопасности населения.

Современные методы наблюдения земной поверхности, включая технологии Global Navigation Satellite System и методы Remote Sensing, широко применяются в геодезических исследованиях. GNSS-измерения обеспечивают высокоточные точечные наблюдения и позволяют формировать непрерывные временные ряды координат. В то же время спутниковые радиолокационные методы позволяют получать пространственную информацию о деформациях на больших территориях.

Несмотря на значительные преимущества, каждый из указанных методов имеет определённые ограничения. В частности, GNSS-наблюдения характеризуются точечным характером измерений, тогда как радиолокационные методы требуют дополнительной наземной проверки и могут быть подвержены атмосферным и геометрическим искажениям.

В связи с этим интеграция данных GNSS и дистанционного зондирования является актуальным направлением исследований. Совместное использование этих методов позволяет повысить достоверность результатов мониторинга и обеспечить более полное представление о пространственно-временной динамике геодинамических процессов.Целью данного

исследования является анализ и возможность интеграции данных глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) и дистанционного зондирования Земли для повышения надёжности и точности мониторинга земной поверхности использованием платформы Google Earth Engine.

Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является анализ возможности интеграции данных глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) и данных дистанционного зондирования Земли для повышения надёжности и точности мониторинга земной поверхности с использованием платформы Google Earth Engine.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- Выполнить подбор и подготовку спутниковых данных дистанционного зондирования Земли на платформе Google Earth Engine для анализа земной поверхности.

- Провести обработку и анализ GNSS-данных с целью получения временных рядов координат и оценки векторных смещений в пунктах наблюдений.

- Реализовать обработку радиолокационных данных для получения пространственной информации о динамике земной поверхности.

- Выполнить сопоставление результатов GNSS-измерений с результатами анализа спутниковых данных в среде Google Earth Engine.

- Оценить согласованность и достоверность результатов интегрированного подхода и определить его возможности и ограничения при мониторинге .

Методика исследования

Для интеграции разнородных данных использовалась облачная платформа Google Earth Engine, позволяющая выполнять обработку больших массивов спутниковых данных без необходимости их локальной загрузки. В рамках исследования были использованы данные спутниковых миссий Sentinel-1 и Sentinel-2. Все этапы обработки данных были реализованы на языке программирования JavaScript в среде Google Earth Engine.

Обработка данных дистанционного зондирования

Для интеграции разнородных данных использовалась облачная платформа Google Earth Engine (GEE) [6-7]. Это позволило унифицировать обработку спутниковых снимков Sentinel-1 (SAR) и Sentinel-2 (оптический диапазон) без локальной загрузки больших объемов данных. Весь вычислительный конвейер реализован на языке JavaScript.

На первом этапе была определена область исследования (AOI) радиусом 5 км от центра карьера. Для анализа деформационной активности использовался косвенный индикатор - изменчивость коэффициента обратного рассеяния радиолокационного сигнала (рисунок 1).



Рисунок 1. Спутниковое изображение исследуемой территории по данным Sentinel-2 в цветовой композиции RGB

На основе временной серии радиолокационных изображений Sentinel-1 (режим IW, нисходящий виток) было рассчитано стандартное отклонение значения поляризации VV (VV_stdDev) за период 2020–2024 гг (рисунок 2). Данный показатель использовался в качестве прокси-переменной, характеризующей нестабильность поверхности, связанную с возможными деформационными процессами, такими как осыпи, оползни и техногенные изменения рельефа.

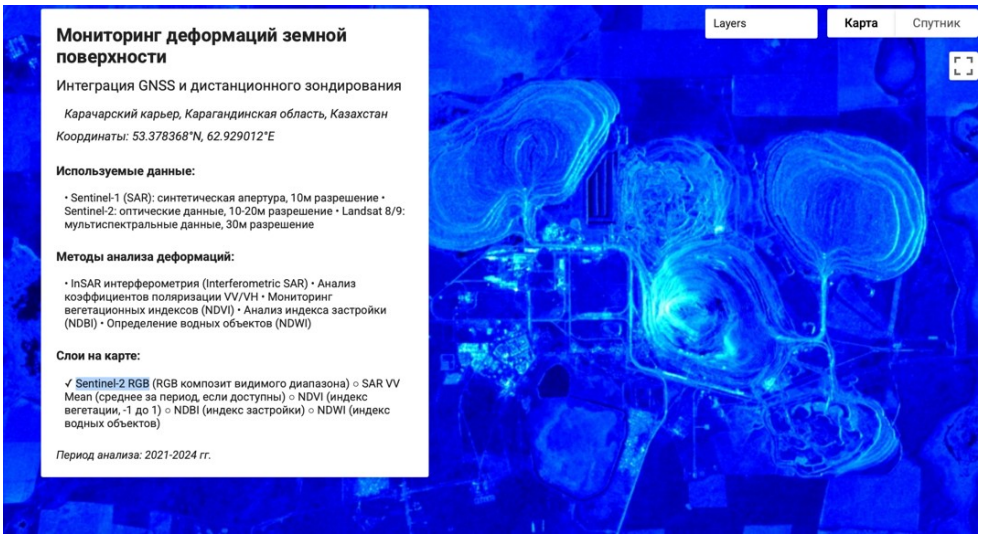


Рисунок 2. Среднее значение коэффициента обратного рассеяния радиолокационного сигнала (VV Mean), полученное по данным Sentinel-1 за исследуемый период

Дополнительно по данным Sentinel-2 были рассчитаны спектральные

индексы: нормализованный вегетационный индекс (NDVI), индекс застроенных территорий (NDBI) и индекс влажности (NDWI). Использование данных индексов позволило учитывать влияние растительности и поверхностной влажности на характеристики радиолокационного сигнала

Координаты трёх постоянно действующих GNSS-станций, расположенных на ключевых элементах карьера (борта и дно), были загружены в среду Google Earth Engine в виде точечных объектов. Для каждой станции методом выборки (sampleRegions) из растра нестабильности (VV_stdDev) было извлечено числовое значение индекса, характеризующее интенсивность изменений поверхности в непосредственной близости от пункта наблюдений.

Полученные значения позволили выполнить количественное сопоставление точечных геодезических измерений с площадными спутниковыми данными и оценить пространственную согласованность между наблюдаемыми смещениями и характеристиками радиолокационного сигнала.

Результаты пространственного анализа представлены на рисунке 5. Зоны с высокими значениями индекса нестабильности (красный спектр) пространственно приурочены к бортам карьера и его дну, что согласуется с высокой скоростью смещений, зафиксированной GNSS-станциями GNSS_01 и GNSS_03 (). Напротив, слабонарушенные участки (синий спектр) характеризуются минимальной изменчивостью SAR-сигнала.

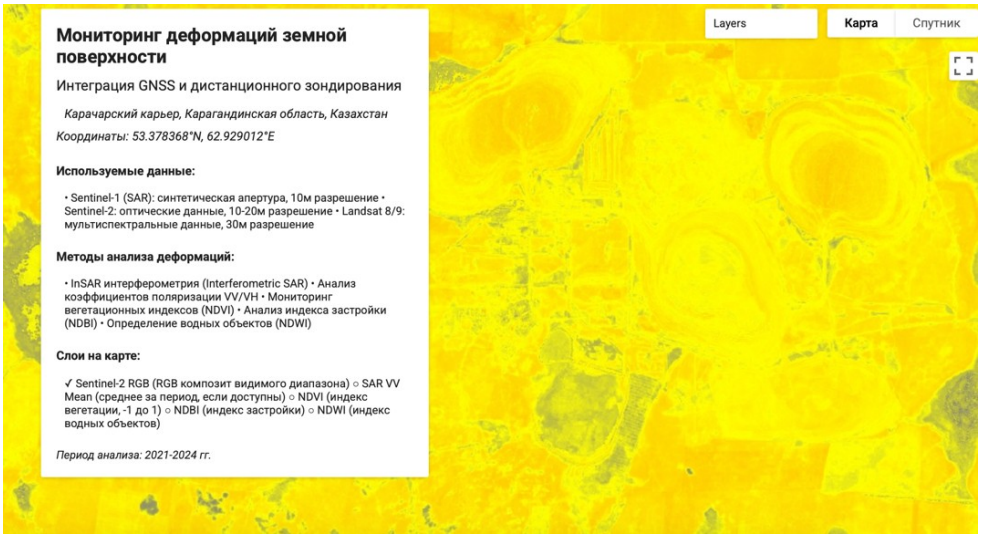


Рисунок 2. Пространственное распределение нормализованного водного индекса (NDWI), рассчитанного по данным Sentinel-2

Результаты и их обсуждение

Результаты пространственного анализа показали, что зоны с повышенными значениями индекса нестабильности радиолокационного сигнала пространственно приурочены к бортам карьера и его дну. Эти участки характеризуются повышенной динамикой поверхности и совпадают с пунктами GNSS-наблюдений, на которых фиксируются наибольшие значения смещений.

В частности, станции GNSS_01 и GNSS_03 демонстрируют повышенные скорости , что согласуется с высокими значениями показателя VV_stdDev, полученного по данным радиолокационных наблюдений. Напротив, участки с низкой изменчивостью радиолокационного сигнала характеризуются стабильным состоянием поверхности и минимальными значениями смещений.

Анализ временных рядов коэффициента обратного рассеяния (VV) в точках размещения GNSS-станций показал наличие резких изменений амплитуды сигнала в определённые периоды времени. Эти изменения коррелируют с известными датами проведения взрывных работ и обрушения уступов карьера, что подтверждает чувствительность радиолокационных данных к техногенным изменениям рельефа.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования интегрированного подхода для выявления активных зон деформации и повышения достоверности мониторинга геодинамических процессов.

Заключение

В рамках данного исследования был разработан метод интеграции спутниковых данных дистанционного зондирования и наземных GNSS-наблюдений для мониторинга земной поверхности с использованием платформы Google Earth Engine.

Результаты исследования показали, что использование изменчивости коэффициента обратного рассеяния радиолокационного сигнала в качестве косвенного индикатора деформационных процессов позволяет выявлять зоны повышенной динамики поверхности. Сопоставление этих данных с результатами GNSS-наблюдений подтверждает пространственную согласованность выявленных аномалий.

Предложенный подход демонстрирует высокую эффективность при локальном мониторинге территорий, связанных с горнодобывающей деятельностью, и может быть использован для анализа деформационных процессов в других регионах. Использование облачной платформы Google Earth Engine позволяет существенно упростить обработку больших объёмов спутниковых данных и повысить оперативность геодезического мониторинга.

Перспективным направлением дальнейших исследований является использование интерферометрических методов обработки радиолокационных данных, а также расширение сети GNSS-наблюдений для повышения точности оценки деформационных процессов.

Список использованной литературы:

1. Wu X., Shao Y., Yang Z., Li Y., Zhang L. Integration of InSAR and GNSS Data: Improved Precision and Spatial Resolution of 3D Deformation // Remote Sensing. – 2026. – Vol. 18. – P. 142.

2. Delen A., Balik Sanli F., Abdikan S. A statistical approach for the integration of multi-temporal InSAR and GNSS-PPP ground deformation measurements // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – P. 1045.

3. Yan H., Dai W., Xu W., Li Z. A method for correcting InSAR interferogram errors using GNSS data and the K-means algorithm // Earth, Planets and Space. – 2024. – Vol. 76. – P. 45.

4. Bozso E., et al. Kalman filter-based integration of GNSS and InSAR observations for local nonlinear strong deformations // Journal of Geodesy. – 2023. – Vol. 97. – P. 85.

5. Tao Q., Liu R., Li X., Zhang H. A method for monitoring three-dimensional surface deformation in mining areas combining SBAS-InSAR and GNSS // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 2214.

6. Sandwell D., Xu X., Chen J. Integration of InSAR and GNSS // Satellite Radar Interferometry: Theory and Practice. – Cambridge: Cambridge University Press, 2025. – P. 310–335.

7. Jiao M. GPS-InSAR data integration method and its application // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 170–173. – P. 2799–2803.