

УДК 528.02;528.77

А. П. Гусев¹, Д. Ш. Фазилова²

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ: ОПЫТ БЕЛАРУСИ И УЗБЕКИСТАНА

¹УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины»,
г. Гомель, Республика Беларусь,
gusev@gsu.by

²Астрономический институт АН Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан,
dil_faz@yahoo.com

Рассмотрены результаты изучения современных геодинамических процессов на территории Узбекистана и Беларуси. Цель работы – анализ и оценка геодинамических процессов в районах с техногенной нагрузкой на примере Узбекистана и Беларуси с использованием методов дистанционного зондирования, геодезических, геофизических и геохимических данных.

Современные геодинамические исследования в условиях техногенной нагрузки играют ключевую роль в оценке и прогнозировании геологических опасностей. В регионах с интенсивной хозяйственной деятельностью, таких как горнодобывающие районы, зоны строительства гидротехнических сооружений и территории с высокими инженерными нагрузками, геодинамические процессы могут существенно изменяться под воздействием антропогенных факторов. Их анализ требует комплексного подхода, включающего дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), геодезические измерения и геоинформационные технологии [1]. Недавние исследования продемонстрировали высокую эффективность геодезических методов в мониторинге деформаций, особенно в техногенно нагруженных районах [2–4].

Настоящее исследование проводится в рамках совместного узбекско-белорусского международного проекта «Оценка современной геодинамической активности в районах с техногенной нагрузкой на основе дистанционного зондирования Земли (на примере Беларуси и Узбекистана)» и представляет собой первый этап комплексного изучения влияния техногенной нагрузки на геодинамику в различных геологических регионах. Работа закладывает основу для дальнейшего картографирования активных зон, прогнозирования рисков и разработки рекомендаций по инженерной защите территорий. Сравнительный анализ геодинамических процессов в регионах с различными тектоническими условиями позволяет выявить как общие закономерности, так и специфические факторы, определяющие деформационные изменения земной поверхности. В Узбекистане геодинамическая активность проявляется в высокой сейсмичности, в Беларуси – в параметрических деформациях и газофлюидопереносе в разломных зонах. Несмотря на различия, оба типа регионов подвержены геодинамическим рискам, что делает их изучение важным для оценки устойчивости инфраструктуры и разработки превентивных мер.

Целью данной работы является сравнительный анализ геодинамических процессов в районах с техногенной нагрузкой на примере Узбекистана и Беларуси с использованием

методов дистанционного зондирования, геодезических, геофизических и геохимических данных. В рамках исследования рассматриваются методологические подходы к обработке данных спутниковой съемки, анализа цифровых моделей рельефа, измерений глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), геофизических и газогеохимических исследований. Основное внимание уделяется разработке системы индикаторов геодинамической активности и унификации методов анализа данных, что позволит применить полученные результаты для других регионов с аналогичными условиями.

Объекты исследования. Ташкентский регион, характеризующийся высокой сейсмической активностью и значительной техногенной нагрузкой, выбран в качестве объекта исследования со стороны Узбекистана. Этот район с развитым промышленным сектором подвержен сейсмическим воздействиям, достигающим $4,8 \text{ м/с}^2$, что создает серьезные вызовы для устойчивости инфраструктуры [5]. Регион расположен в пределах Западного Тянь-Шаня – крупнейшего внутриконтинентального орогенного пояса Центральной Азии с активной тектоникой и разломной системой [6,7]. Через него проходит Таласо-Ферганский разлом, влияющий на поднятие Чаткальского и Ферганского хребтов [8, 9]. Каржантауский разлом демонстрирует вертикальные смещения до 1 000 м и скорости до 3,5 мм/месяц, дополнительное влияние оказывают Кумбельский и Северо-Ферганский разломы [10]. Частые землетрясения (1966, 1977, 1980 гг.) подчеркивают нестабильность региона [11]. В промышленно развитых районах Ангрена и Алмалыка техногенная нагрузка может оказывать влияние на тектонические процессы, что требует дополнительного изучения.

Гомельский регион находится на границе между Припятским прогибом, Воронежской антеклизой, Жлобинской и Брагинско-Лоевской седловинами. На северной ступени Припятского прогиба в зонах активных разломов фиксируются аномалии вертикальных движений земной поверхности, временные аномалии гравитационного и геомагнитного полей, высокий тепловой поток, гидро- и газогеохимические аномалии.

Материалы и методы. Для оценки деформаций земной коры в Ташкентском регионе использованы данные 16 ГНСС-станций Агентства по Кадастру за 2018–2024 гг., обработанные в программе GAMIT/GLOBK [12]. Интерполяция скоростей деформации выполнялась методом уточненного наименьших квадратов коллокации (Shen et al.) с использованием программы VISR [13]. Линеаментный анализ проводился на основе снимков Landsat 8 (USGS, Earth Explorer) с обработкой в средах LEFA [14] и ArcGIS 10.8. Определение линейных структур направлено на выявление их корреляции с деформациями земной поверхности, полученными по данным ГНСС.

В Гомельском регионе для индикации газифлюидодинамики в разломных зонах потоками метана использованы данные космической съемки спутника Sentinel-5P TROPOMI, спутников Sentinel-2 и семейства Landsat; для линеаментного анализа – цифровая модель рельефа, снимки спутников Sentinel-2 и семейства Landsat (программа LEFA). Наземные работы включают гелиевую и водородную съемки, геофизические исследования.

Результаты и обсуждение. Анализ ГНСС-данных выявил увеличение скоростей смещения станций к юго-востоку, где расположены промышленные районы. В Ташкенте скорость составляет 24,7 мм/год (TASH), тогда как в Ангрено-Алмалыкском промышленном районе она достигает 30,1 мм/год. Это связано с активностью разлома Каржантау и Северо-Ферганского поднятия, а также техногенным воздействием. В Ташкенте фиксируется дилатация (~14,7 нанодеформации/год), тогда как в прилегающих районах преобладают отрицательные деформации (до –30 нанодеформации/год). Восточный разлом Каржантау демонстрирует усиленные деформации (~20 нанодеформации/год), что подтверждает его роль в сейсмической активности региона. Для уточнения динамики напряженного состояния и его связи с сейсмичностью в Ангрено-Алмалыкском регионе проведен линеаментный анализ. Он показал, что плотность линеаментов увеличивается до и после землетрясений, а за 20 дней до и через 14 дней после событий наблюдается их сокращение.

Основные разломные структуры (СС, ВЗ, СЗ-ЮВ) совпадают с зонами повышенной плотности линеаментов, особенно вблизи эпицентров землетрясений 23 и 27 июня, а также 26 сентября 2019 года. Выявленные закономерности актуальны для землетрясений магнитудой ~ 3 и характерны для зон выхода палеозойских пород, что подтверждает влияние техногенной нагрузки на напряженное состояние земной коры.

Проводимые в 1980–1990-е гг. на территории юго-востока Беларуси газогеохимические и геофизические исследования выявили высокую геодинамическую активность ряда тектонических структур. На участке «Александровка» зафиксированы высокоградиентные аномалии вертикальных движений земной поверхности (10–20 и более мм/км в год), локализованные вблизи разрывных нарушений. Здесь же наблюдались аномальные короткопериодные колебания геомагнитного поля. Амплитуда колебаний полного вектора напряженности геомагнитного поля ΔT составила 10–20 нТл (вне разлома – до 5 нТл). Комплексные геофизические исследования зафиксировали в зоне Александровского разлома сопряженные в пространстве аномалии водорода, радона и торона в подпочвенном воздухе и поля атмосферного электричества.

Уникальным методом диагностики глубинного газофлюидопереноса в зонах разломов является гелиметрия. Проведенные на юго-востоке Беларуси исследования выявили аномалии высокого содержания гелия в грунтовых водах и водах первого напорного горизонта приурочены к Александровскому разлому, в минеральных водах на участке «Костюковка» (интервал опробования 576–603 м). Изучение водорода в подпочвенном воздухе позволило установить: а) аномалии повышенного содержания водорода, пространственно совпадающие с аномалиями водорастворенного гелия; б) вариации содержания водорода, коррелирующие с приливными деформациями, в тензочувствительных зонах разломов [15, 16].

На основе дистанционного зондирования Земли была разработана методика использования тропосферного метана как индикатора геодинамической активности [17]. Изучение тропосферного метана проводилось с помощью космической съемки спутника Sentinel-5P с сенсором TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument). Для выявления локальных источников метана использована съемка спутников Sentinel-2 и семейства Landsat в каналах зонах коротковолнового инфракрасного излучения: SWIR1 и SWIR2. В качестве индикатора потоков метана предложен индекс NDMI (Normalized Difference Methane Index): $NDMI = (SWIR2 - SWIR1) / (SWIR2 + SWIR1)$.

Для слабосейсмических регионов древних платформ в качестве газогеохимических индикаторов современной геодинамической активности тектонических структур предложены показатели, приведенные в таблице 1. Сопряженные геохимические поля гелия, водорода и метана в разных компонентах геологической среды взаимно дополняют друг друга, что позволяет отличать геодинамические эффекты от техногенных и биогенных.

Выводы. Проведенное на территории Узбекистана исследование показало, что скорости ГНСС-станций увеличиваются к юго-востоку, достигая 30,1 мм/год в Ангрен-Алмалыкском регионе, что связано с разломной тектоникой и техногенным воздействием. Линеаментный анализ подтвердил связь плотности линейных структур с сейсмической активностью, выявив их сокращение за 20 дней до и через 14 дней после землетрясений. Комплексный подход с использованием ГНСС-данных и спутниковых снимков доказал свою эффективность для мониторинга геодинамических процессов и может применяться для оценки рисков в техногенно нагруженных районах.

В ходе исследований на территории юго-востока Беларуси выявлены зоны проявления современной геодинамической активности и на основе проведенных работ предложен комплекс газогеохимических индикаторов современной геодинамической активности тектонических структур в условиях древних платформ, включающий гелий (в подземных водах), водород (в подпочвенном газе) и метан (в тропосфере).

Таблица 1 – Газогеохимические индикаторы геодинамические активных зон (для платформенных условий)

Показатель	Стабильная зона	Геодинамически активная зона
Содержание гелия в грунтовых водах, мл/л	$< 7 \cdot 10^{-5}$ мл/л	$> 7 \cdot 10^{-5}$ мл/л
Содержание водорода в почвенном газе, ppm	< 1	> 1
Временная динамика водорода в почвенном газе	Суточная гармоника	Суточная и полусуточная гармоника
Содержание тропосферного метана (по данным Sentinel-5P TROPOMI), ppb	Статистически не отличается от регионального фона	Статистически достоверно выше регионального фона
Спектральный индекс NDMI	$< 0,1$	$> 0,1$

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X25УЗБ-079).

Список литературы

1. Elliott, J. R. Earth Observation for Crustal Tectonics and Earthquake Hazards / J. R. Elliott, M. de Michele, H.K. Gupta, // Surv. Geophys. – 2020. – Т. 41. – С. 1355–1389.
2. Bian, H. Monitoring large-area mining subsidence by GNSS based on IGS stations / H. Bian [et al.] // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2014. – Т. 24. – С. 514–519.
3. Szczerbowski, Z. Mining induced seismic events and surface deformations monitored by GPS permanent stations / Z. Szczerbowski, J. Jura // Acta Geodyn. Geomater. – 2015. – Т. 12, № 3. – С. 237–248.
4. Combined Study of a Significant Mine Collapse Based on Seismological and Geodetic Data / M. Ilieva [et al.] // Remote Sens. – 2020. – Т. 12, № 10. – С. 1570. DOI: 10.3390/rs12101570.
5. The GSHAP Global Seismic Hazard Map / D. Giardini [et al.] // International Geophysics. – 2003. – Т. 81. – С. 1233–1239.
6. Burtman, V. S. Late Cenozoic slip on the Talas-Ferghana fault, the Tien Shan, Central Asia / V. S. Burtman, S. F. Skobelev, P. Molnar, // Geol. Soc. Am. Bull. – 1996. – Т. 108. – С. 1004–1021.
7. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions / A. V. Zubovich [et al.] // Tectonics. – 2010. – Т. 29.
8. Brunet, M.-F. Geological evolution of central Asian basins and the western Tien Shan range / M.-F. Brunet, T. McCann, E.R. Sobel // Geological Society, London. – 2017.
9. Bande, A. E. The tectonic evolution of the Western Tien Shan. – Potsdam, August 2016.
10. Хамидов, Л. А. Изучение полей напряжения Чаткальской горной зоны Западного Тянь-Шаня / Л. А. Хамидов // Геодинаміка. – 2010. – Т. IX, № 1. – С. 57–66.
11. Мавлянова, Н. Г. Особенности сейсмогравитационных процессов в зонах активного проявления землетрясений Центральной Азии (на примере территории Узбекистана) / Н. Г. Мавлянова [и др.] // Геоэкология. – 2021. – № 2. – С. 27–40.
12. Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.7 / T. A. Herring [et al.]. – Cambridge: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 2018. – 54 p.
13. Shen, Z. K. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements / Z. K. Shen, D. D. Jackson // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 1996. – № 101. – С. 27957–27980.

14. Шевырëв, С. Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab / С. Л. Шевырëв // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.

15. Гумен, А. М. Газогеохимические индикаторы геодинамической активности глупинных разломов на юго-востоке Беларуси / А. М. Гумен, А. П. Гусев // Літасфера. – 1997. – № 6. – С. 140–149.

16. Гумен, А. М. Подпочвенный водород – индикатор изменений напряженно-деформированного состояния земной коры асейсмичных регионов / А. М. Гумен, А. П. Гусев, В. П. Рудаков // Доклады Академии наук. – 1998. – Том 359. – № 3. – С. 390.

17. Гусев, А. П. Индикаторы активных разломов (на примере Гомельской структурной перемычки) / А. П. Гусев // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2024. – Т. 66. – № 1. – С. 35–44.

УДК 338.48

О. В. Янчуревич¹, Д. А. Морозик²

**РАЗВИТИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА
НА ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ
ГРОДНЕНСКОГО РЕГИОНА**

¹УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,
г. Гродно, Республика Беларусь,
o.v.yanchurevich@grsu.by

²ГПУ «Республиканский ландшафтный заказник «Озеры»,
аг. Озеры, Гродненский район, Гродненская область, Республика Беларусь,
info@gpu-ozera.by

В статье показан положительный опыт развития экологического туризма в пределах особо охраняемых природных территорий Гродненской области. Детально рассматриваются направления работы по развитию экологического туризма в пределах Республиканского ландшафтного заказника «Озëры».

Благоприятное экологическое состояние, высокая степень сохранности естественной растительности и диких животных, наличие разных типов ландшафтов, живописных природных объектов – этим отличаются особо охраняемые природные территории. Ценность белорусских особо охраняемых природных территорий имеет международное значение, что подтверждается их соответствующим статусом в рамках ЮНЕСКО, Рамсарской конвенции и других международных соглашений. Именно эти территории уникальны с точки зрения биологического и ландшафтного разнообразия, представляют значительный интерес для развития экологического туризма.

Сегодня особо охраняемые природные территории занимают более 9 % площади Беларуси. Именно поэтому актуально использование ООПТ в экологическом туризме. Это перспективное направление заложено и в Национальную стратегию развития системы особо охраняемых природных территорий до 1 января 2030 года, которая утверждена Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 02.07.2014 № 649.

В Гродненской области ООПТ составляют 10,1 %. Предназначение особо охраняемых природных территорий – это сохранение типичных и уникальных природных ландшафтов страны, разнообразного животного и растительного мира на этих ландшафтах, а также объектов природного и этнокультурного наследия народов, населяющих эти территории.