Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-152-158

Выявление критических смещений и деформаций на объектах недропользования по временным рядам ГНСС-наблюдений

П.А. Докукин, А.А. Поддубский, Р.В. Шевчук, А.И. Маневич ✉, М.В. Алешин
Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация
✉ ai.manevich@yandex.ru

Резюме: В статье рассмотрены подходы к геодеформационному анализу (выявлению критических смещений и деформаций) на объектах недропользования по временным рядам ГНСС-наблюдений. Показано, что для оценки устойчивости горнотехнических объектов недостаточно ограничиваться только анализом абсолютных смещений отдельных пунктов, поскольку одинаковые по величине перемещения могут соответствовать различным стадиям деформационного процесса. На основе анализа отечественных и зарубежных публикаций, а также нормативно-методических документов рассмотрены существующие подходы к интерпретации скоростей смещений, допустимых деформаций и уровней опасности. Особое внимание уделено переходу от оценки кинематики отдельных пунктов к анализу пространственного деформационного поля. В качестве информативных параметров предложено использовать главные оси деформации, дилатацию и максимальные сдвиговые деформации, совместный анализ которых позволяет выявлять участки растяжения, сжатия, разуплотнения и сдвиговой концентрации. Показано, что универсальные пороговые критерии не могут быть непосредственно перенесены на все объекты недропользования и должны уточняться с учетом инженерно-геологических условий, режима горных работ, особенностей наблюдательной сети и точности измерений. Отмечено, что достоверность интерпретации временных рядов в значительной степени зависит от качества их обработки, что дополнительно подчеркивает актуальность развития отечественных сервисов высокоточной обработки ГНСС-данных для задач геомеханического и геодинамического мониторинга.

Ключевые слова: ГНСС-наблюдения, геодеформационный анализ, деформационный мониторинг, объекты недропользования, временные ряды координат, критические смещения, деформационное поле, главные оси деформации, дилатация, максимальный сдвиг, геомеханическая интерпретация, устойчивость откосов, промышленная безопасность

Благодарности: Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FSSF-2026-0077).

Для цитирования: Докукин П.А., Поддубский А.А., Шевчук Р.В., Маневич А.И., Алешин М.В. Выявление критических смещений и деформаций на объектах недропользования по временным рядам ГНСС-наблюдений. *Горная промышленность*. 2026;(5):152–158. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-152-158

Identification of critical displacements and deformations at subsoil assets based on GNSS observation time series

P.A. Dokukin, A.A. Poddubsky, R.V. Shevchuk, A.I. Manevich✉, M.V. Aleshin
RUDN University, Moscow, Russian Federation
✉ ai.manevich@yandex.ru

Abstract: The article examines approaches to identifying critical displacements and deformations at mining assets using the GNSS observation time series. It is shown that assessing the stability of mining-engineering facilities should not be limited to analyzing absolute displacements of individual stations only, since displacements of the same magnitude may correspond to different stages of the deformation process. Existing approaches to interpretation of the displacement rates, allowable deformations, and hazard levels are reviewed based on an analysis of Russian and international publications, as well as regulatory and methodological documents. Particular attention is given to transition from assessing the kinematics of individual points to analyzing the spatial deformation field. The principal strain axes, dilatation, and maximum shear strain are proposed as informative parameters, which combined analysis makes it possible to identify zones of extension, compression, loosening, compaction, and shear strain concentration. It is shown that universal threshold criteria cannot be directly transferred to all the mining assets and should be refined with regard to the specific engineering-geological conditions, mining regime, characteristics of the monitoring network, and measurement accuracy. It is also noted that reliability of the time-series interpretation largely depends on the quality of data

processing, which highlights the relevance of developing domestic high-precision GNSS data processing tools for geomechanical and geodynamic monitoring tasks.

Keywords: GNSS observations, deformation monitoring, subsoil assets, coordinate time series, critical displacements, deformation field, principal deformation axes, dilatation, maximum shear strain, geomechanical interpretation, slope stability, industrial safety

Acknowledgements: This work was funded by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSF-2026-0077).

For citation: Dokukin P.A., Poddubsky A.A., Shevchuk R.V., Manevich A.I., Aleshin M.V. Identification of critical displacements and deformations at subsoil assets based on GNSS observation time series. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):152–158. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-152-158

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается изменением напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и земной поверхности. Эти изменения проявляются в оседаниях, горизонтальных смещениях, локальных деформациях бортов карьеров, отвалов, уступов, в нарушении устойчивости подработанных участков и инженерных сооружений. Поэтому задача своевременного обнаружения опасных тенденций в деформационном процессе имеет не только научное, но и прямое прикладное значение, поскольку связана с промышленной безопасностью, сохранностью инфраструктуры и снижением риска аварийных событий. Современный деформационный мониторинг опирается на совмещение геодезических, маркшейдерских и геомеханических методов, однако именно ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы) наблюдения заняли особое место как метод получения высокоточных координатных рядов [1] во времени (рис 1).

Исторически переход к спутниковым методам мониторинга был связан с тем, что классические линейно-угловые методы измерений: нивелирование, тахеометрические наблюдения, хотя и обеспечивают высокую точность, но часто недостаточно оперативны и слабо приспособлены к непрерывному контролю быстро меняющихся процессов.

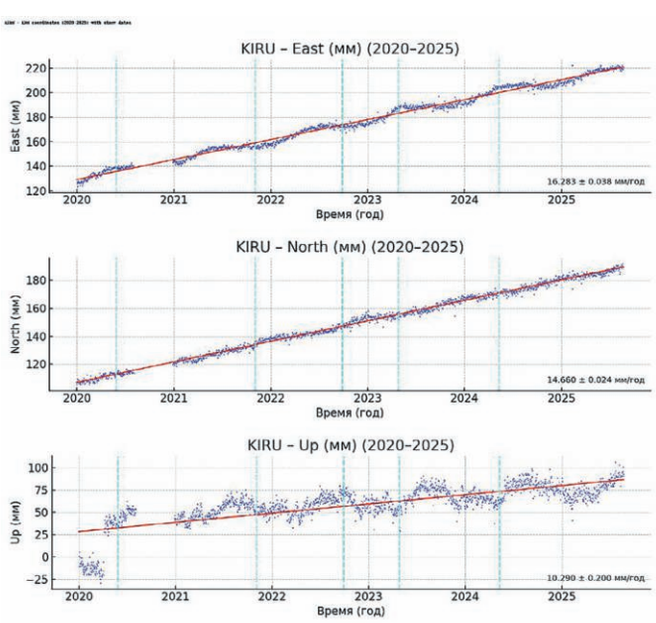


Рис. 1
Временные ряды координатных смещений ГНСС-станции FAIR (2020–2025)

Fig. 1
Time series of coordinate displacements at the FAIR GNSS station (2020–2025)

Уже в ранних работах по применению ГНСС для мониторинга склоновых деформаций было показано, что спутниковые методы позволяют идентифицировать значимые смещения с высокой частотой (как постоянно действующие станции, так и периодичные дискретные измерения), что особенно важно для опасных производственных объектов. Потому что наблюдаемые движения могут быть как медленными и квазилинейными, так и скачкообразными, связанными с изменением горнотехнической или сейсмической обстановки [1; 2].

Методология

Классическая работа [1] стала одной из ранних методических основ использования ГНСС в задачах деформационного мониторинга. Авторы показали, что спутниковые наблюдения могут быть использованы не только для фиксации уже произошедших смещений, но и для оценки кинематики деформирования, если наблюдения организованы как последовательный временной ряд. Для объектов недропользования предельное состояние устойчивости бортов карьеров/горных выработок определяется не одной координатой или одним измерением, а динамикой изменения положения пункта во времени.

В работе [2] показана эффективность сочетания ГНСС-измерений и роботизированных тахеометров для мониторинга крупных карьеров. Авторы рассматривали не просто автоматизацию наблюдений, а построение полноценных гибридных систем контроля, способных непрерывно отслеживать пространственные перемещения на больших площадях. Эта работа важна тем, что фактически задала современную логику интегрированного мониторинга: ГНСС используется как высокоточный опорный и кинематический компонент, а наземные геодезические средства дополняют его в зоне локализации мониторинга (рис. 2).

Следующий важный этап связан с ориентаций технологии ГНСС как основы специализированных систем мониторинга деформаций на горных предприятиях. В работе [3] подчёркивалось, что развитие деформационного мо-



Рис. 2
Совмещенный мониторинг с помощью ГНСС и тахеометра

Fig. 2
Combined monitoring using the GNSS and a total station

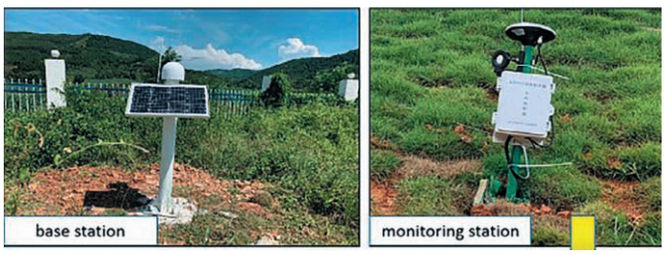


Рис. 3
Устройство автономной станции мониторинга средствами ГНСС

Fig. 3
Setup of a standalone GNSS monitoring station

ниторинга делает возможным переход от разовых измерений к систематическому контролю геомеханических и геодинамических процессов и явлений. Авторы предложили использовать различные методики наблюдений в зависимости от пространственного масштаба задачи: для больших территорий – сеть опорных станций (постоянно действующих), для локальных деформаций – дискретные наблюдения.

Конечной целью мониторинга в задачах оценки устойчивости объектов недропользования является не только идентификация величин смещений, но и их содержательная интерпретация для выявления опасных процессов. Как правило, основное внимание уделялось определению собственно смещений, то есть вектора смещения наблюдаемого пункта за заданный временной интервал. Однако для обоснованной оценки устойчивости объекта такой информации недостаточно. Одинаковые по модулю смещения могут соответствовать принципиально различным геомеханическим и геодинамическим ситуациям: с одной стороны, безопасному долговременному тренду, с другой, начальной или уже развивающейся фазе ускоряющегося деформирования, предшествующей переходу системы в критическое состояние. В связи с этим научный акцент постепенно сместился от простой регистрации смещений к деформационному анализу как индикаторам эволюции напряженно-деформированного состояния [4; 5]. Для инженерной интерпретации необходимо различать фоновые движения, допустимые эксплуатационные деформации, аномальные изменения режима деформирования и предаварийные стадии.

В зарубежной литературе подчёркивается, что универсальных пороговых значений, пригодных для всех горнотехнических объектов, не существует. Это связано с различиями в инженерно-геологических условиях, типов пород, масштабах деформируемого массива, конфигурации откосов и бортов, режиме горных работ, а также в характеристиках самих временных рядов.

Наиболее наглядные численные градации приведены в работе [6], посвящённой мониторингу оползней по данным ГНСС. В этой модели при скорости смещения менее 2 мм/сут состояние считалось стабильным; диапазон 2–10 мм/сут соответствовал первому уровню предупреждения; 10–30 мм/сут – второму уровню предупреждения, отражающему заметное ускорение деформирования; при скорости более 30 мм/сут и касательном угле кривой более 85° состояние классифицировалось как аварийное (рис. 3). Однако сами авторы рассматривают эти пороги как модель, привязанную к конкретному объекту, а не как универсальный стандарт.

В российской практике вопрос интерпретации смещений и деформаций на горных предприятиях, в частности на карьерах и отвалах, рассматривается не только как задача инструментального контроля, но и как элемент системы обеспечения промышленной безопасности. В инструкции по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости[1] говорится, что мониторинг оценки рисков должен обеспечивать безопасное ведение горных работ и включать обоснование требуемой точности и периодичности наблюдений (табл. 1), перечень контролируемых параметров, признаки нарушения устойчивости, а также допустимые значения деформаций и критерии безопасности.

Таблица 1
Зависимость периодичности наблюдений за состоянием откосов карьеров от скоростей смещений

Table 1
A dependence of the observation frequency for open-pit slope conditions on the displacement rates

Скорость смещения, мм/сут	Периодичность наблюдений, сут
0,1–0,5	365 (1 раз в год)
0,5–1,0	180 (2 раза в год)
1,0–2,0	90 (ежеквартально)
2,0–5,0	45
5,0–10,0	15
10,0–20,0	7–8
20,0 и выше	3–4

Принципиально важно, что в методических указаниях прямо подчеркивается то, что система мониторинга определяется индивидуально для каждого объекта, а на этапе эксплуатации точность и периодичность наблюдений могут уточняться эксплуатирующей или специализированной организацией в соответствии с целями и задачами мониторинга. Это означает, что приведенные в нормативно-методической литературе значения следует рассматривать не как универсальные константы, а как ориентировочную и регламентирующую основу для построения локальной системы наблюдений на конкретном объекте недропользования (табл. 2).

В нормативной практике различают долгосрочный и оперативный мониторинг. Долгосрочный мониторинг организуется на длительный период эксплуатации и ориентирован на выявление признаков крупномасштабных деформаций, тогда как оперативный мониторинг применяется в локальных зонах критических или развивающихся деформаций, в рабочих зонах и на участках размещения внутрикарьерной инфраструктуры. Соответственно, численные характеристики смещений интерпретируются не изолированно, а в контексте режима наблюдений и уровня опасности процесса. По результатам долгосрочного мониторинга состояние откосов и бортов должно оцениваться по нескольким уровням безопасности. В качестве диагностических признаков используются коэффициент запаса устойчивости, относительные горизонтальные деформации, а также общие величины смещений массива (табл. 3). При этом упругие и затухающие деформации относятся к работоспособному состоянию объекта, тогда как значительные деформации с развитием трещин и заколов характеризуют ограниченно работоспособное состояние, а достижение предельных параметров соответствует аварийной или критической стадии.

1 Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л.: ВНИМИ, 1971. 187 с. Режим доступа: http://gost.gtsever.ru/Data2/1/4294853/4294853736.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

Таблица 2
Периодичность наблюдений за состоянием отвалов

Table 2
Observation frequency for waste dump conditions

Характеристика устойчивости	Скорость смещения, см/сут	Периодичность наблюдений	Примечание
Устойчивый. Соотношение скоростей (Vвер > 0, Vгор ≈ 0; Vгор << Vвер)	Менее 0,3	Раз в квартал	Работы на отвале допускаются
Подвижный (устойчивый относительно). (Vгор ≈ Vвер)	0,3–1,0	Раз в месяц	Работы на отвале допускаются
	1,0–5,0	Раз в неделю	Работы на отвале допускаются
	5,0–10,0	Два раза в неделю	Работы на отвале допускаются
	10–20	Через день	Работы на отвале допускаются
	20–30	Ежедневно	Работы на отвале допускаются
	30–50	Дважды в смену	Работы на отвале допускаются в исключительных случаях
Неустойчивый. (Vвер > 0, Vгор >> 0, Vгор >> Vвер)	Более 50	Дважды в смену	Работы на отвале не допускаются

Таблица 3
Оценка состояния откоса по результатам долгосрочного мониторинга

Table 3
Assessment of the slope condition based on long-term monitoring results

Показатель	Критерии	Характеристика состояния
1	Коэффициент запаса $n \geq 1{,}3$; относительные горизонтальные деформации $\varepsilon \leq 1 \cdot 10^{-3}$	Упругие деформации
2	n = 1,3-1,2; общие смещения поверхности бортов карьеров высотой более 100 м – 200–300 мм и более; $\varepsilon = (1\text{-}5) \cdot 10^{-3}$	Затухающие во времени смещения, возникновение микро- и макротрещин
3	n = 1,2-1,1; $\varepsilon = (5\text{-}20) \cdot 10^{-3}$; общие величины смещений массива в пределах призмы оползания глубоких карьеров – 1,5–2,0 м и более	Значительные деформации прибортового массива; на поверхности возникают видимые заколы и трещины; деформации во времени преимущественно затухают
4	n = 1,1-1,05 и менее; $\varepsilon = (20\text{-}30) \cdot 10^{-3}$	Предельное состояние откоса; со временем наблюдаются разрушения бортов

Существенно и то, что при анализе скоростей рекомендуется учитывать только те случаи, когда величины смещений превышают погрешности измерений; если же смещения находятся в пределах точности наблюдений, анализ должен опираться на накопленные смещения и устойчивость их направлений.

Обработка временных рядов ГНСС является сегодня одной из центральных задач деформационного анализа. В работах [4; 7] показано, что координатные ряды представляют собой сумму полезного сигнала и набора шумовых и систематических составляющих: ошибок тропосферы и ионосферы, нестабильности системы отсчёта, орбитальных погрешностей, сезонных эффектов, коррелированных шумов и других факторов. Авторы подчёркивают, что для надёжного извлечения слабых сигналов – вплоть до миллиметровых скоростей, необходимо корректно задавать как функциональную, так и стохастическую модель временного ряда смещений. Для прикладных задач недропользования это означает, что без фильтрации и анализа шумовой структуры даже высокоточные координаты не гарантируют корректного вывода о реальной геодинамической ситуации.

Вопрос геодинамического и геодезического мониторинга объектов недропользования получил развитие прежде всего в работах [8; 9]. В статьях о геодезическом обеспечении геодинамического мониторинга подчёркивается, что геодезический метод является одним из надежных способов количественной оценки состояния массива и техногенных объектов, поскольку позволяет напрямую фиксировать величины и направления смещений. Наблюдения должны быть связаны с геомеханической интерпретацией, а сами данные – использоваться не как самоцель, а как основа для диагностики состояния объекта. И.Ю. Розанов и соавт. описывают организацию ГНСС-наблюдений, размещение фундаментальных реперов, используемую аппаратуру и подходы к интерпретации результатов при открытых горных работах на руднике «Железный» АО «Ковдорский ГОК» [10]. ГНСС здесь рассматривается как часть инженерной системы наблюдений, ориентированной на контроль устойчивости и принятие решений в условиях действующего горного предприятия. Схожая логика прослеживается в исследовании Е.В. Ситникова и соавт., которые разработали методику инструментального контроля устойчивости карьерных откосов с использованием ГНСС-технологий [11]. То есть речь идёт уже не об «определении координат», а о создании наблюдательной схемы, позволяющей выявлять развитие деформационного процесса на откосах и уступах карьера. Значительный интерес представляет и работа А.А. Панжина и соавт. по Коркинскому угольному месторождению, где ГНСС-мониторинг и моделирование поля деформаций рассматриваются совместно [12].

Примером интерпретации временных рядов ГНСС-наблюдений является исследование В.И. Кафтана и соавт., выполненное на постоянно действующей ГНСС-станции (рис. 4) комплексной геомагнитной обсерватории «Климовская» методом Precise point position (PPP) [13]. Полученные результаты представляют существенный интерес именно с точки зрения методики анализа временных рядов, так как в работе был рассмотрен набор специализированных сервисов онлайн-обработки файлов статических ГНСС-измерений. В обработке участвовали сервисы AUSPOS, CSRS-PPP, OPUS, GAPS, APPS, Magic-GNSS и SCOUT. Однако по результатам тестирования для регулярной обработки файлов наблюдений пункта KLIM были отобраны три сервиса – OPUS, AUSPOS и CSRS-PPP, которые авторы сочли наиболее пригодными для решения поставленной задачи. Тем самым



Рис. 4
Комплект ГНСС-оборудования, установленный на геодезическом пункте KLIM для постоянных измерений

Fig. 4
A GNSS set installed at the KLIM geodetic station for continuous measurements

в статье фактически показано, что надёжная интерпретация временного ряда должна опираться не на один способ обработки, а на сопоставление нескольких независимых решений, полученных разными вычислительными схемами.

Установлено, что сервисы проявили себя по-разному: наименьшие значения среднеквадратического отклонения и наименьший разброс измерений получены при использовании AUSPOS и CSRS-PPP, тогда как при обработке через OPUS разброс координат оказался заметно выше. В численном выражении авторы приводят следующие оценки: для AUSPOS и CSRS-PPP средние значения СКО составили 2–5 мм в плане и 7–15 мм по высоте, тогда как для OPUS разброс увеличивался до 2–20 мм в плане и 15–30 мм по высоте. Эти результаты принципиально важны для деформационного мониторинга, поскольку показывают, что один и тот же исходный массив спутниковых наблюдений может давать разную степень устойчивости координатного ряда в зависимости от выбранной стратегии обработки. В методическом и прикладном отношении это указывает на целесообразность разработки российского сервиса онлайн-обработки статических ГНСС-измерений, который обеспечивал бы независимую, воспроизводимую и технологически устойчивую обработку временных рядов, работу в принятых государственных и международных системах координат, а также возможность интеграции с отечественными системами геодинамического и геомеханического мониторинга. Для задач выявления критических смещений и деформаций на объектах недропользования создание такого инструмента представляется особенно важным, поскольку позволяет объединить требования к точности, оперативности, метрологической прослеживаемости и технологической независимости обработки наблюдений.

Результаты

Критическим, опасным может быть не абсолютное смещение одной точки, а пространственно согласованная зона растяжения, сжатия, сдвига или локального расхождения векторов смещения. Если смещение во времени – это кинематическая характеристика одного пункта, то деформация описывает относительное изменение положения группы пунктов и, таким образом, больше связана с изменением состояния массива. Для интерпретации геодинамического состояния территории необходимо вычислять комплекс деформационных характеристик [14]. К числу таких параметров (рис. 5–7) прежде всего относятся главные оси деформации, позволяющие определить направления максимального растяжения и сжатия среды, дилатация, отражающая суммарное изменение площади или объема деформируемого участка и, соответственно, преобладание процессов разуплотнения либо уплотнения, а также сдвиг, характеризующий интенсивность взаимного смещения элементов среды и степень развития касательных деформаций. Совместный анализ этих показателей позволяет выполнять оценку напряженно-деформированного состояния массива, выявлять участки концентрации деформаций и выделять потенциально опасные зоны, где возможно развитие неустойчивых геодинамических процессов.

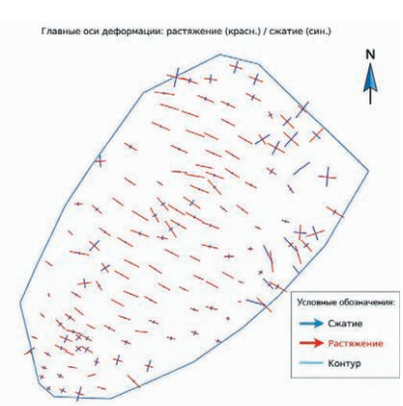


Рис. 5
Пространственное распределение главных осей деформации на исследуемой территории

Fig. 5
Spatial distribution of the principal deformation axes in the surveyed area

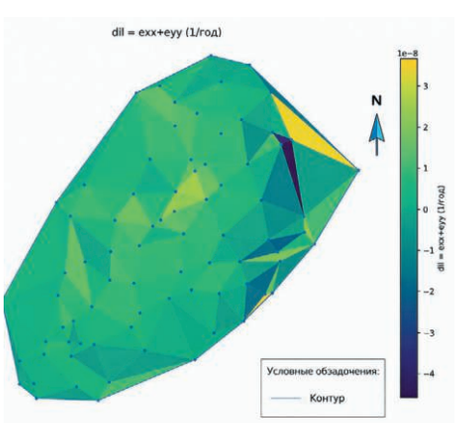


Рис. 6
Пространственное распределение дилатации деформационного поля на исследуемой территории

Fig. 6
Spatial distribution of the deformation field dilatation in the surveyed area

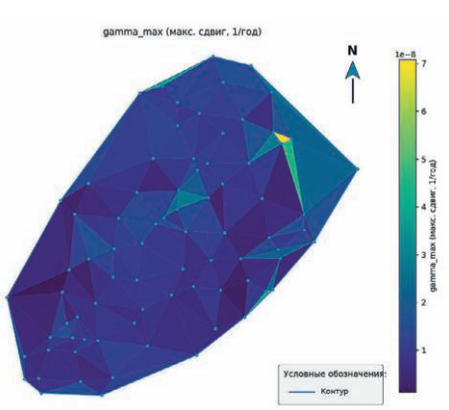


Рис. 7
Пространственное распределение максимальных сдвиговых деформаций на исследуемой территории

Fig. 7
Spatial distribution of the maximum shear strains in the surveyed area

Выводы

Проведённый обзор отечественных и зарубежных исследований, а также нормативно-методических документов показал, что универсальных пороговых критериев критических смещений и деформаций для всех объектов недропользования не существует. Численные значения скоростей смещений, относительных деформаций и уровней предупреждения должны рассматриваться как ориентировочная основа, требующая обязательной адаптации к конкретным инженерно-геологическим условиям, масштабу объекта, режиму горных работ, типу наблюдательной сети и точности измерений. При этом надёжность интерпретации временных рядов ГНСС в значительной степени определяется качеством их обработки, включая учёт шумовых, сезонных и систематических составляющих, без чего даже высокоточные координатные определения не обеспечивают достоверного вывода о реальном геодинамическом состоянии объекта. В этой связи особую актуальность приобретает разработка отечественной интеллектуальной непространственной системы, включающей сервис высокоточной обработки статических и долговременных ГНСС-наблюдений, который обеспечивал бы технологическую независимость, воспроизводимость результатов, а также возможность интеграции с национальными системами геомеханического и геодинамического мониторинга. При мониторинге объектов недропользования использование ГНСС-наблюдений не должно ограничиваться лишь фиксацией абсолютных смещений отдельных пунктов. Наиболее перспективным направлением развития мониторинга является комплексный анализ пространственного деформационного поля, включающий оценку главных осей деформации, дилатации и максимальных сдвиговых деформаций. Совместное использование этих характеристик позволяет выявлять зоны растяжения, сжатия, разуплотнения, уплотнения и концентрации сдвиговых деформаций, а следовательно, более обоснованно выделять потенциально опасные участки на объектах недропользования. Таким образом, интерпретация временных рядов ГНСС-наблюдений в сочетании с анализом деформационных параметров и развитием отечественных инструментов их высокоточной обработки может рассматриваться как методическая основа для раннего выявления критических состояний и повышения эффективности систем геомеханического и геодинамического мониторинга горных предприятий.

Список литературы / References

1. Gili J.A., Corominas J., Rius J. Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*. 2000;55(3):167–192. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00127-1
2. Brown N., Kaloustian S., Roeckle M. Monitoring of open pit mines using combined GNSS satellite receivers and robotic total stations. In: Potvin Y. (ed.) *Slope Stability 2007: Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, September 12–14, 2007*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2007, pp. 417–429. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/708_27
3. Gao J.-X., Hu H. Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009;1(1):1081–1088. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.166
4. He X., Montillet J.-P., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*. 2017;106:12–29. https://doi.org/10.1016/j.jog.2017.01.004
5. Gazeaux J., Williams S., King M., Bos M., Dach R., Deo M. et al. Detecting offsets in GPS time series: First results from the detection of offsets in GPS experiment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013;118(5):2397–2407. https://doi.org/10.1002/jgrb.50152
6. Chen Z., Huang G., Xie W., Zhang Y., Wang L. GNSS real-time warning technology for expansive soil landslide – A case in Ningming demonstration area. *Remote Sensing*. 2023;15(11):2772. https://doi.org/10.3390/rs15112772
7. Шевчук Р.В., Маневич А.И., Лосев И.В., Алёшин И.М., Акматов Д.Ж., Татаринова Т.А., Урманов Д.И. Анализ воздействия радиопомех и параметров навигационных спутниковых измерений на их точность на залесенных территориях. *Геодезия и картография*. 2024;(8):23–30. https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1010-8-23-30
Shevchuk R.V., Manevich A.I., Losev I.V., Aleshin I.M., Akmatov D.Zh., Tatarinova T.A., Urmanov D.I. Analysis of the radio interference and measurement parameters impact on GNSS accuracy in forested areas. *Geodeziya i Kartografiya*. 2024;(8):23–30. (In Russ.). https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1010-8-23-30
8. Панжин А.А., Сашурин А.Д., Панжина Н.А., Мазуров Б.Т. Геодезическое обеспечение геодинамического мониторинга объектов недропользования. *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2016;(4):26–39.
Panzhin A.A., Sashourin A.D., Panzhina N.A., Mazurov B.T. Geodesic support of geodynamic monitoring of objects of subsurface use. *Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2016;(4):26–39. (In Russ.).
9. Кафтан В.И., Миронов И.К., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Магуськин В.М. Современные движения и деформации земной коры в окрестности Авачинского вулкана (п-ов Камчатка) с 2015 по 2023 гг. *Физика Земли*. 2025;(3):115–128. Режим доступа: https://earthphysras.ru/s3034645225030093-1/ (дата обращения: 23.05.2026).
Kaftan V.I., Mironov I.K., Manevich A.I., Shvchuk R.V., Maguskin V.M. Recent movements and deformations of the earth's crust in the region of Avacha volcano (Kamchatka peninsula) from 2015 to 2023. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2025;61(3):385–395. https://doi.org/10.1134/S1069351325700302

10. Розанов И.Ю., Кузнецов М.А., Достовалов Р.Н. Опыт применения методов космической геодезии для геомеханического мониторинга массивов горных пород при открытых горных работах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(4):100–106. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/100_106_4_2017.pdf (дата обращения: 23.05.2026).
Rozanov I.Yu., Kuznetsov M.A., Dostovalov R.N. Case history of space geodesy in geomechanical monitoring of rock mass under open pit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(4):100–106. (In Russ.). Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/100_106_4_2017.pdf (accessed: 23.05.2026).

11. Ситникова Е.В., Хмырова Е.Н., Ожигин Д.С. Методика инструментального контроля состояния устойчивости карьерных откосов с использованием GNSS технологий. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2020;1(1):161–168. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-1-1-161-168
Sitnikova E.V., Hmyrova E.N., Ozhigin D.S. Methodology of instrumental control of stability of quarry slopes using GNSS technologies. *Interexpo GEO-Siberia*. 2020;1(1):161–168. (In Russ.). https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-1-1-161-168

12. Панжин А.А., Мазуров Б.Т., Панжина Н.А. Геодинамический мониторинг и моделирование поля деформаций на Коркинском угольном месторождении. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(2):94–109.
Panzhin A.A., Mazurov B.T., Panzhina N.A. Geodynamic monitoring and modeling of the deformation field a t the Korkinsky coal deposit. *Izvestiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(2):94–109. (In Russ.).

13. Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Побединский М.Г., Шаяхметов Р.Ф., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В. ГНСС-наблюдения на комплексной геомагнитной обсерватории «Климовская». *Геофизические процессы и биосфера*. 2023;22(2):143–154. Режим доступа: https://static.ifz.ru/10.21455/GPB2023.2-7 (дата обращения: 23.05.2026).
Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Pobedinsky M.G., Shayahmetov R.F., Manevich A.I., Shevchuk R.V., Losev I.V. GNSS-observations at the integrated geomagnetic observatory “Klimovskaya”. *Geophysical Processes and Biosphere*. 2023;22(2):143–154. (In Russ.). Available at: https://static.ifz.ru/10.21455/GPB2023.2-7 (accessed: 23.05.2026).

14. Шевчук Р.В. Обоснование и разработка метода выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород на основе деформационного анализа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(S2):29–42. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_2_29
Shevchuk R.V. Justification and development of a method for identifying zones of possible disturbance of insulating properties of rock massif on the basis of deformation analysis. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(S2):29–42. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_2_29

Информация об авторах
Докукин Петр Александрович – кандидат технических наук, начальник научного управления, главный научных сотрудник, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3284-8738; e-mail: dokukin-pa@rudn.ru
Поддубский Антон Александрович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник института экологии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-9796-2924; e-mail: poddubskiy-aa@rudn.ru
Шевчук Роман Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник института экологии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3461-6383; e-mail: shevchuk.002@mail.ru
Маневич Александр Ильич – научный сотрудник института экологии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-7486-6104; e-mail: ai.manevich@yandex.ru
Алешин Михаил Вячеславович – младший научный сотрудник института экологии, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: aleshin-mv@rudn.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 03.05.2026
Поступила после рецензирования: 22.06.2026
Принята к публикации: 23.06.2026

Information about the authors
Peter A. Dokukin – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific Department, Principal Research Scientist, RUDN University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3284-8738; e-mail: dokukin-pa@rudn.ru
Anton A. Poddubsky – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Institute of Ecology, RUDN University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-9796-2924; e-mail: poddubskiy-aa@rudn.ru
Roman V. Shevchuk – Cand. Sci. (Eng.), senior Researcher at the Institute of Ecology, RUDN University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3461-6383; e-mail: shevchuk.002@mail.ru
Alexander I. Manevich – Researcher at the Institute of Ecology, RUDN University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-7486-6104; e-mail: ai.manevich@yandex.ru
Mikhail V. Aleshin – Junior Researcher at the Institute of Ecology, RUDN University, Moscow, Russian Federation; e-mail: aleshin-mv@rudn.ru

Article info
Received: 03.05.2026
Revised: 22.06.2026
Accepted: 23.06.2026