DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

УДК 528.482:624.131.5

АДАПТИВНЫЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Нормухаммадов О.С., Бегимкулов Д.К., Бегимкулов Э.К.,
Ташкентский государственный технический университет

Аннотация. *В горнопромышленных районах природные и техногенные факторы формируют изменяющиеся инженерно-геологические условия, способные проявляться в деформациях оснований, фундаментов, зданий и сооружений. В работе предложен методический подход к включению адаптивного геодезического мониторинга деформаций в систему оценки таких природно-техногенных изменений. Мониторинговая система рассматривается как последовательность дискретных состояний, формируемых по результатам отдельных циклов наблюдений, а управляющее воздействие связывается с допустимым изменением состава и весов наблюдений, числа повторов, интервала между циклами и, при необходимости, состава дополнительных измерений. В единой постановке объединены критерии точности, надёжности, чувствительности к минимально обнаруживаемому смещению (MDD) и ресурсной эффективности. Разграничены оптимизация геометрии сети на стадии проектирования (FOD) и эксплуатационная адаптация наблюдательной программы после закрепления деформационных марок (SOD/комбинированная постановка). Разработана структурно-алгоритмическая схема замкнутого цикла «наблюдение – уравнивание и QA/QC – оценка смещений – проверка MDD – оптимизация – параметры следующего цикла». Подчёркнуто, что геодезические данные фиксируют пространственно-временной отклик объекта, тогда как интерпретация причин деформаций должна выполняться совместно с инженерно-геологической, гидрогеологической и техногенной информацией. Работа имеет методический характер и ориентирована на последующую апробацию на техногенно нагруженных горнопромышленных территориях, в том числе в зоне влияния Ангренского горнопромышленного комплекса.*

Annotatsiya. *Tog‘-kon sanoati hududlarida tabiiy va texnogen omillar o‘zgaruvchan muhandislik-geologik sharoitlarni shakllantirib, ular zamin, poydevor, bino va inshootlar deformatsiyalarida namoyon bo‘lishi mumkin. Ushbu ishda deformatsiyalarning adaptiv geodezik monitoringini bunday tabiiy-texnogen o‘zgarishlarni baholash tizimiga integratsiyalash bo‘yicha uslubiy yondashuv taklif etilgan. Monitoring tizimi alohida kuzatuv sikllari natijalari asosida shakllanadigan diskret holatlar ketma-ketligi sifatida ko‘rib chiqiladi, boshqaruv ta’siri esa kuzatuvlar tarkibi va vaznlarining, takroriylik sonining, sikllar oralig‘idagi vaqt oralig‘ining hamda zarurat bo‘lganda qo‘shimcha o‘lchashlar tarkibining yo‘l qo‘yiladigan o‘zgarishlari bilan bog‘lanadi. Yagona yondashuvda aniqlik, ishonchlilik, minimal aniqlanadigan siljishga (MDD) nisbatan sezgirlik hamda resurs samaradorligi mezonlari birlashtirilgan. Loyihalash bosqichida tarmoq geometriyasini optimallashtirish (FOD) va deformatsion markalar mahkamlangandan so‘ng kuzatuv dasturining ekspluatatsion adaptatsiyasi (SOD/kombinatsiyalangan yondashuv) aniq chegaralangan. «Kuzatuv – tenglashtirish va QA/QC – siljishlarni baholash – MDD tekshiruvi – optimallashtirish – keyingi sikl parametrlari» ko‘rinishidagi yopiq siklli tizimli-algoritmik sxema ishlab chiqilgan. Geodezik ma’lumotlar obyektning fazoviy-vaqtincha aks ta’sirini (reaksiyasini) qayd etishi, deformatsiyalar sabablarini talqin qilish esa muhandislik-geologik, gidrogeologik va texnogen axborotlar bilan birgalikda bajarilishi zarurligi ta’kidlangan. Ish uslubiy xususiyatga ega bo‘lib, texnogen yuklamaga*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

uchragan tog‘-kon sanoati hududlarida, shu jumladan Angren tog‘-kon majmuasi ta’sir zonasida keyinchalik aprobatsiyadan o‘tkazishga yo‘naltirilgan.

Abstract. *In mining regions, natural and anthropogenic factors shape dynamic engineering-geological conditions that can manifest as deformations of subgrades, foundations, buildings, and structures. This study proposes a methodological framework for incorporating adaptive geodetic deformation monitoring into the assessment system of such natural and technogenic changes. The monitoring framework is conceptualized as a sequence of discrete states established through individual observation epochs, with control actions governed by permissible adjustments to observation configurations and weightings, repetition counts, inter-epoch sampling intervals, and, where necessary, supplementary measurement schemes. A unified formulation integrates criteria for precision, reliability, sensitivity to the minimum detectable displacement (MDD), and cost-resource efficiency. A clear distinction is drawn between network geometry optimization during the design stage (First-Order Design, FOD) and operational adaptation of the monitoring scheme following the monumentation of deformation benchmarks (Second-Order Design, SOD / combined formulation). A closed-loop structural-algorithmic workflow is developed: "observation – adjustment and QA/QC – displacement estimation – MDD verification – optimization – subsequent epoch parameters." It is emphasized that while geodetic observations record the spatio-temporal response of an engineering asset, causative interpretation of deformations requires joint synthesis with engineering-geological, hydrogeological, and anthropogenic datasets. The paper carries a methodological focus oriented toward subsequent experimental validation across heavily disturbed mining terrains, including the impact zone of the Angren mining and industrial complex.*

Ключевые слова: *природно-техногенные изменения; горнопромышленная территория; инженерно-геологические условия; геодезический мониторинг; деформации сооружений; дискретное управление; оптимизация геодезической сети; FOD; SOD; надёжность; чувствительность; минимально обнаруживаемое смещение; MDD; адаптивный мониторинг.*

Kalit so‘zlar: *tabiiy-texnogen o‘zgarishlar; tog‘-kon sanoati hududi; muhandislik-geologik sharoitlar; geodezik monitoring; inshootlar deformatsiyasi; diskret boshqaruv; geodezik tarmoqni optimallashtirish; FOD; SOD; ishonchlilik; sezgirlik; minimal aniqlanadigan siljish; MDD; adaptiv monitoring.*

Keywords: *natural and technogenic changes; mining territory; engineering geological conditions; geodetic monitoring; structural deformations; discrete control; geodetic network optimization; FOD; SOD; reliability; sensitivity; minimum detectable displacement; MDD; adaptive monitoring.*

Введение. Горнопромышленные территории характеризуются сочетанным воздействием природных и техногенных факторов. Разработка месторождений, формирование выемок и отвалов, изменение дренажных условий, перераспределение нагрузок и локальные изменения свойств основания могут сопровождаться деформациями земной поверхности, фундаментов и инженерных сооружений. В таких условиях мониторинг необходим не только для фиксации факта смещения, но и для получения пространственно-временных данных, используемых при комплексной оценке инженерно-геологических условий.

Геодезические методы сохраняют ключевую роль в инструментальном контроле деформаций зданий и сооружений, поскольку позволяют количественно определять осадки, крены и пространственные перемещения. Для горнопромышленных территорий геодезический контроль применяется также при наблюдениях за просадками, оползневыми смещениями, бортами карьеров и отвальными массивами; современные обзоры показывают

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

широкое использование GNSS в открытых, подземных и нарушенных горных районах [25, 26]. При этом измеренная деформация является индикатором реакции системы «грунтовый массив – основание – сооружение», но сама по себе не устанавливает её генезис. Причинная интерпретация требует сопоставления геодезических результатов с инженерно-геологическими, гидрогеологическими и техногенными факторами.

Достоверность геодезического заключения определяется не только паспортной точностью прибора, но и геометрией сети, устойчивостью опорной основы, составом наблюдений, их избыточностью, стохастической моделью, периодичностью циклов и способностью сети обнаруживать инженерно значимые смещения. Поэтому задача мониторинга тесно связана с оптимальным проектированием и последующей адаптацией наблюдательной программы.

Классическая теория оптимального проектирования геодезических сетей разделяет задачи выбора конфигурации сети и оптимизации наблюдательной программы. В работах S.L. Kuang показано, что для деформационного мониторинга целесообразно совместно учитывать точность, внутреннюю и внешнюю надёжность, чувствительность и экономичность [12–15]. Для фиксированной конфигурации сети задача второго порядка направлена на выбор типов наблюдений и их точностей (весов) при заданных требованиях к качеству [12]. Современные исследования развивают многокритериальные и глобальные методы оптимизации, в том числе с учётом физической модели деформирования [16–18].

Для мониторинговых сетей одной координатной точности недостаточно. Чувствительность характеризует способность сети обнаруживать заданное смещение и количественно может оцениваться через минимально обнаруживаемое смещение (Minimal Detectable Displacement, MDD). Величина MDD зависит от конфигурации сети, функциональной и стохастической моделей и принятой статистической постановки [19–21]. Следовательно, сеть с малыми стандартными отклонениями координат не обязательно оптимальна с точки зрения обнаружения слабых, но инженерно значимых деформаций.

Отдельную проблему создаёт циклический характер наблюдений. Традиционная схема предполагает заранее установленную конфигурацию и программу измерений, повторяемую через фиксированные интервалы. Однако результаты очередного цикла могут изменять представление об устойчивости опорных пунктов, ковариационной структуре, чувствительности сети и динамике объекта. Это создаёт предпосылки для адаптивной постановки, в которой завершённый цикл используется для обоснованной настройки следующего без нарушения межэпоховой сопоставимости.

Цель работы – разработать методическую структуру адаптивного геодезического мониторинга деформаций сооружений как элемента оценки природно-техногенных изменений горнопромышленных территорий на основе дискретного управления и современных критериев качества деформационных сетей. Предлагаемый подход ориентирован, в том числе, на последующую апробацию в зоне влияния Ангренского горнопромышленного комплекса; в настоящей статье результаты такой натурной апробации не приводятся.

Научная новизна предлагаемого подхода

1. Предложено формализовать многоцикловый геодезический мониторинг деформаций сооружений в условиях природно-техногенного воздействия как дискретную управляемую систему, в которой состояние x_k объединяет актуальную деформационную и качественную информацию k-го цикла, а u_k задаёт допустимую корректировку параметров следующего цикла.

2. Разграничены проектная оптимизация геометрии сети и размещения пунктов (FOD) и эксплуатационная адаптация наблюдательной программы после физического закрепления деформационных марок (прежде всего SOD/комбинированная постановка),

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

что позволяет сохранять межэпоховую сопоставимость и одновременно изменять состав наблюдений, их повторность, веса и периодичность.

3. Предложена структура интеграции геодезического мониторинга в оценку инженерно-геологических условий техногенно нагруженных территорий: параметры следующего цикла выбираются по совокупности критериев точности P, надёжности R, чувствительности S (включая MDD) и ресурсной эффективности C, а интерпретация выявленных смещений выполняется совместно с данными о природных и техногенных факторах. Количественное преимущество подхода требует натурной верификации.

Материалы и методы. Методической основой служат теория оптимальных дискретных процессов, математическое программирование и теория оптимального проектирования геодезических сетей. Исходная система мониторинга включает устойчивые опорные пункты, деформационные марки, средства измерений и совокупность наблюдений, выполняемых в последовательные моменты времени $t_0, t_1, \ldots, t_k$. В контексте горнопромышленной территории результаты геодезических измерений рассматриваются как один из компонентов комплексной инженерно-геологической оценки, а не как самостоятельный способ установления причин деформации.

Введём обобщённый вектор состояния мониторинговой системы:

$$x_k = [d_k, C_k, r_k, s_k]^T,$$

где d_k – вектор оценённых координат и/или смещений контролируемых точек на k-м цикле; C_k – ковариационная информация; r_k – показатели надёжности и контроля качества; s_k – показатели чувствительности сети. Управляющий вектор u_k может включать состав наблюдений, число повторов, веса или требуемую точность, интервал до следующего цикла и подключение дополнительных измерений.

Переход между состояниями в линейной методической постановке может быть записан как

$$x_{k+1} = Lx_k + Bu_k,$$

где L – оператор перехода состояния, B – оператор влияния управляющих воздействий. Эта запись не означает физического переноса закреплённых деформационных марок в каждом цикле; изменение геометрии относится преимущественно к стадии проектирования или обоснованной реконфигурации сети.

Для оценки качества управления используется функционал

$$J = F(x_N) + \Sigma\, f(x_k, u_k), \quad k = 0, \ldots, N-1,$$

где F характеризует качество конечного состояния, а f учитывает промежуточные штрафы – например, ресурсные затраты, длительность цикла или нарушение ограничений. В многокритериальной постановке используется вектор качества

$$Q = \{P, R, S, C\},$$

где P – точность, R – надёжность, S – чувствительность, C – стоимость/трудоёмкость. В зависимости от задачи критерии могут быть сведены к скалярной целевой функции с весовыми коэффициентами либо рассматриваться как система ограничений и Парето-критериев.

Критерий чувствительности связан с MDD – минимальным смещением, которое сеть способна обнаружить при заданных вероятностях ошибок I и II рода. MDD дополняет традиционные показатели точности и надёжности и особенно важен, когда контролируемые деформации сопоставимы с уровнем измерительного шума [19–21].

На управляющие воздействия накладывается область допустимости U: геометрия сооружения и доступность точек, взаимная видимость, возможности применяемого оборудования, допустимые средние квадратические погрешности, требования к надёжности и MDD, продолжительность цикла, безопасность и ресурсные ограничения. Для поиска решения могут использоваться методы возможных направлений,

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

математическое программирование и глобальные/эволюционные алгоритмы; выбор конкретного метода зависит от формы функционала и ограничений [16, 17].

Инженерно-геологическая интерпретация выделяется в отдельный аналитический уровень. После установления статистически значимых перемещений их пространственное положение и временная динамика должны сопоставляться с изменением гидрогеологических условий, свойствами и состоянием грунтов, техногенными нагрузками, геометрией горных выработок, отвалов и другими факторами. Тем самым геодезический мониторинг отвечает прежде всего на вопросы «где, сколько и как быстро смещается», а комплексная инженерно-геологическая оценка – на вопрос о вероятном механизме и условиях развития деформации.

Результаты и обсуждение. Результатом методического обобщения является замкнутая схема адаптивного мониторинга. На первом этапе формируется или принимается существующая сеть: устойчивые опорные пункты, деформационные марки и наблюдательная станция. На k-м цикле выполняются геодезические измерения, после чего проводится уравнивание, анализ невязок, оценка дисперсионно-ковариационных характеристик и контроль грубых ошибок. Далее определяются межэпоховые смещения Δx, Δy, Δz и проверяется их статистическая значимость с учётом чувствительности/MDD.

Полученная информация формирует состояние x_k. Оптимизационный блок оценивает допустимые варианты u_k по четырём группам критериев: точность, надёжность, чувствительность и эффективность. Если ограничения не выполнены, изменяются допустимые параметры наблюдательной программы и расчёт повторяется. Если критерии удовлетворены, формируется программа цикла k+1: состав наблюдений, число повторов, требуемые веса/точности, интервал наблюдений и, при необходимости, дополнительные измерения.

Предлагаемый подход согласуется с классической логикой FOD/SOD, но переносит её в многоэпоховый контур обратной связи. На стадии проектирования FOD определяет геометрию сети и размещение пунктов; SOD определяет состав и точность наблюдений. В эксплуатационном мониторинге физически закреплённые марки, как правило, должны сохраняться для обеспечения сопоставимости эпох, поэтому адаптация преимущественно затрагивает наблюдательную программу, а не координаты марок.

Включение MDD принципиально меняет критерий достаточности сети. Современные исследования подтверждают, что чувствительность зависит не только от количества наблюдений, но и от конфигурации, размерности и функциональной модели сети [19–21]. Следовательно, механическое увеличение числа измерений либо уменьшение стандартных отклонений ещё не гарантирует оптимального обнаружения деформаций.

Надёжность также должна рассматриваться совместно с точностью. Оптимизация второго порядка при фиксированной конфигурации может быть направлена на повышение способности сети выявлять грубые ошибки при соблюдении ограничений по точности [12]. Для мониторинга техногенно нагруженных объектов это особенно существенно, поскольку ошибочная интерпретация единичного выброса как реального перемещения способна привести к неверной оценке развития инженерно-геологического процесса.

Современные инструментальные технологии расширяют набор допустимых управляющих решений. Роботизированные тахеометры обеспечивают автоматизированные повторные наблюдения по призмам, GNSS – длительный пространственный контроль, а комбинированные системы повышают временную информативность мониторинга [22–26]. Вместе с тем выбор технологии должен включаться в модель через реальные ограничения видимости, многолучёвости, рефракции, частоты регистрации и требуемой точности, а не рассматриваться как универсальная замена геодезической сети.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

Для горнопромышленных территорий принципиально важна интерпретационная связка между геодезическим откликом и природно-техногенной обстановкой. Наличие статистически значимого смещения ещё не позволяет однозначно отнести его к осадке основания, оползневому процессу, влиянию горных работ, изменению уровня подземных вод или локальному дефекту сооружения. Поэтому результаты цикла k должны поступать не только в блок оптимизации следующего геодезического цикла, но и в систему комплексной оценки инженерно-геологических условий. Именно в таком качестве адаптивный мониторинг может использоваться при исследовании зон влияния горнопромышленных комплексов.

На рис. 1 предложенная методика представлена как единый структурно-алгоритмический контур. Левая часть показывает объект и систему наблюдений; центральная – уравнивание, QA/QC, вычисление смещений и MDD; правая – критерии и алгоритм оптимизации. Нижний блок отдельно показывает проектную FOD/SOD постановку. Такая композиция подчёркивает ключевое отличие модели: следующий цикл формируется на основе информации предыдущего, но только в пределах инженерно и метрологически допустимых изменений.

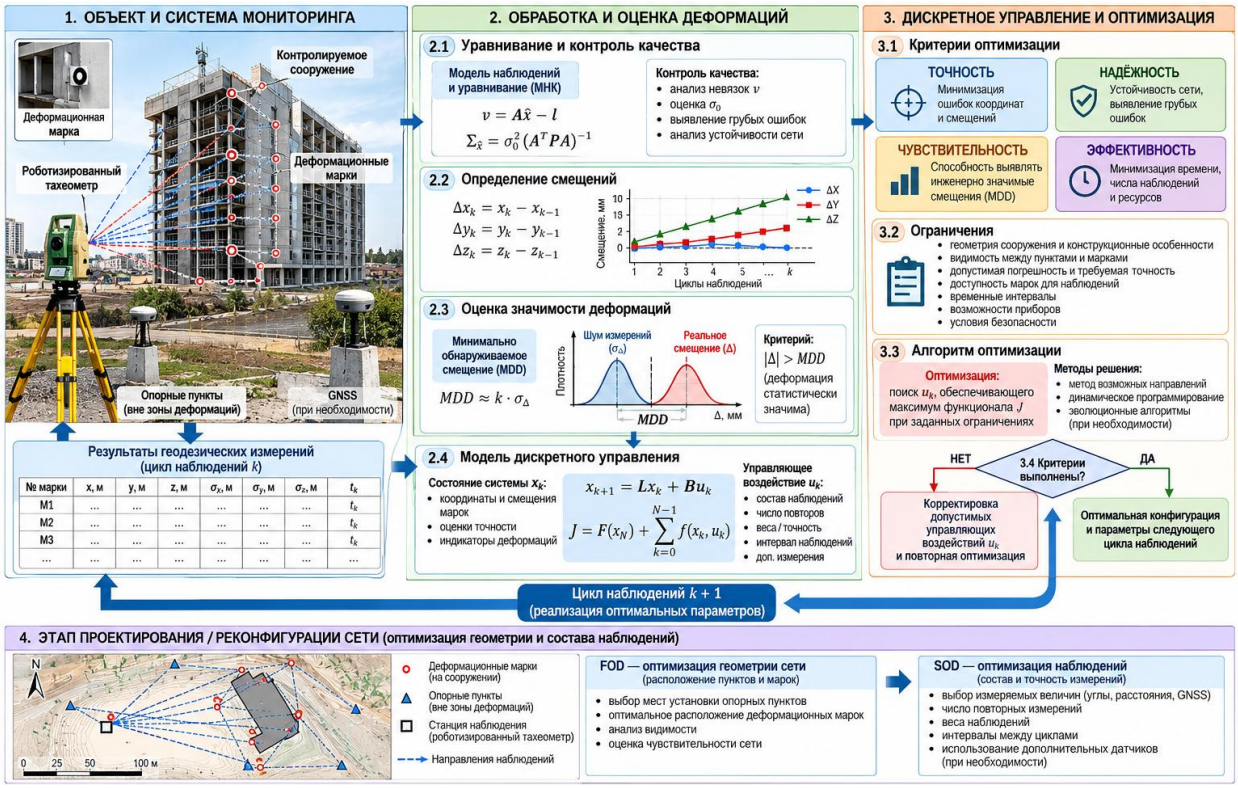

Рис. 1. Структурно-алгоритмическая схема адаптивной оптимизации геодезического мониторинга деформаций на основе дискретного управления (разработано авторами)

Представленная схема является концептуально-методической, а не результатом численного эксперимента. В исходных материалах отсутствуют координаты конкретной сети, характеристики приборов, число эпох, реальные ковариационные матрицы и рассчитанные значения MDD. Поэтому в настоящей работе не приводятся количественные утверждения о сокращении числа марок, повышении точности или экономии времени. Эти показатели должны быть получены при апробации на конкретном объекте.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

Алгоритм практической реализации. 1. Формирование исходной сети и фиксация опорных пунктов и деформационных марок.

2. Задание критериев P, R, S и C: допустимой погрешности, требований к надёжности, целевого MDD, времени и ресурсоёмкости.

3. Выполнение цикла k, уравнивание и QA/QC; оценка координат, смещений, ковариаций и устойчивости опорной основы.

4. Проверка статистической значимости Δx, Δy, Δz и чувствительности сети.

5. Сопоставление выявленных пространственно-временных изменений с доступной инженерно-геологической, гидрогеологической и техногенной информацией.

6. Формирование состояния x_k и множества допустимых управляющих воздействий u_k.

7. Решение оптимизационной задачи и проверка альтернатив по точности, надёжности, MDD, наблюдаемости и практической реализуемости.

8. Формирование параметров цикла k+1: состав наблюдений, повторы, веса/точность, интервал и дополнительные измерения.

9. Выполнение следующего цикла и повторение контура обратной связи; реконфигурация геометрии сети допускается только как отдельная проектная задача.

Выводы. 1. Геодезический мониторинг деформаций сооружений на горнопромышленных территориях целесообразно рассматривать как инструмент количественной фиксации пространственно-временного отклика системы «грунтовый массив – основание – сооружение» и как один из компонентов комплексной оценки природно-техногенных изменений.

2. Предложена методическая структура, в которой многоцикловый мониторинг формализован как дискретная система с обратной связью: состояние x_k объединяет деформационную и качественную информацию текущего цикла, а u_k задаёт допустимые параметры следующего цикла.

3. Критерий оптимальности должен быть многокомпонентным: точность необходимо рассматривать совместно с надёжностью, чувствительностью/MDD и ресурсной эффективностью. Использование только координатной точности не гарантирует способности сети обнаруживать инженерно значимые смещения.

4. Оптимизация геометрии сети (FOD) и эксплуатационная адаптация наблюдений (SOD/комбинированная постановка) должны быть разделены. После закрепления деформационных марок предпочтительно адаптировать состав, повторность, веса и периодичность наблюдений, сохраняя межэпоховую сопоставимость.

5. Геодезически выявленная деформация не должна автоматически отождествляться с конкретным инженерно-геологическим процессом. Для установления её вероятного механизма необходима совместная интерпретация с данными о свойствах грунтов, гидрогеологических условиях и техногенных воздействиях.

6. Разработанная структурно-алгоритмическая схема имеет методический характер. Следующим этапом должна стать её натурная апробация, в том числе для объектов в зоне влияния Ангренского горнопромышленного комплекса, с расчётом MDD и показателей надёжности, сравнением базовой и адаптивной программ наблюдений и оценкой фактической ресурсной эффективности.

Литература

1. Нестеренок М.С. Обоснование методики и точности геодезических наблюдений за деформациями здания книгохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь в период эксплуатации // Вестник Белорусского национального технического университета. 2006. № 6. С. 12–15.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

2. Simonjan V., Shendyapina S. The need for geodetic control to monitor the displacements of buildings and structures // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 284. 05006. DOI: 10.1051/e3sconf/202128405006.

3. Хатум Х.М., Мустафин М.Г. Оптимизация места расположения роботизированных станций наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. 2020. № 9. С. 2–13.

4. Mrówczyńska M., Sztubecki J. The use of evolutionary algorithms for designing an optimum structure of a geodesic measurement and control network // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 262. 07008. DOI: 10.1051/matecconf/201926207008.

5. Шевченко Г.Г., Гура Д.А., Лобанова Ю.В. Об обработке результатов определения пространственного положения деформационных марок с использованием поискового способа метода наименьших квадратов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15, № 4. С. 653–665.

6. Хидиров С.Т. Мониторинг напряженно-деформированного состояния оснований зданий и сооружений как фактор обеспечения безопасной эксплуатации // Инновации и инвестиции. 2020. № 1. С. 291–294.

7. Лабузнов А.В. Использование сплайн-функций при наблюдении за деформациями зданий // Естественные и технические науки. 2020. № 4. С. 110–112.

8. Labuznov A. Possibility of using local spline functions for estimating displacement values when observing deformations of buildings // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164.

9. Шендяпина С.В., Лабузнов А.В. Использование сплайн-функций двух переменных при наблюдениях за деформациями зданий // Успехи современной науки и образования. 2017. Т. 1, № 5. С. 123–127.

10. Пропой А.И. Элементы теории оптимальных дискретных процессов. М.: Наука, 1973.

11. Муравьева О.В. Робастность динамического дискретного процесса с заданным множеством достижимости // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2010. № 6. С. 80–85.

12. Kuang S.L. Second-Order Design: Shooting for Maximum Reliability // Journal of Surveying Engineering. 1993. Vol. 119, No. 3. P. 102–110. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9453(1993)119:3(102).

13. Kuang S.L., Chrzanowski A. Optimization of integrated survey schemes for deformation monitoring // Geomatica. 1994. Vol. 48, No. 1. P. 9–22. DOI: 10.5623/geomat-1994-0001.

14. Kuang S.L. Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications. Ann Arbor Press, 1996. 368 p.

15. Kuang S.L. Optimization and Design of Deformation Monitoring Schemes. Fredericton: University of New Brunswick, 1996.

16. Yetkin M., Inal C. Optimal Design of Deformation Monitoring Networks Using the Global Optimization Methods // The 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). Springer, 2015. P. 27–31.

17. Alizadeh-Khameneh M., Eshagh M., Jensen A.B.O. Optimization of deformation monitoring networks using finite element strain analysis // Journal of Applied Geodesy. 2018. Vol. 12, No. 2. P. 187–197. DOI: 10.1515/jag-2017-0040.

18. Yulaikhah, Pramumijoyo S., Widjajanti N., Widagdo A. Optimal design of the Sermo Fault deformation monitoring network using sensitivity criteria based on geological information // Arabian Journal of Geosciences. 2021. Vol. 14. DOI: 10.1007/s12517-021-08411-6.

19. Küreç P., Konak H. A priori sensitivity analysis for densification GPS networks and their capacities of crustal deformation monitoring: a real GPS network application // Natural

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.29

Hazards and Earth System Sciences. 2014. Vol. 14. P. 1299–1308. DOI: 10.5194/nhess-14-1299-2014.

20. Prószyński W. Investigating support by minimal detectable displacement in confidence region determination and significance test of displacements // Journal of Geodesy. 2021. DOI: 10.1007/s00190-021-01550-4.

21. Carvajal Rodríguez F., Klein I., Koenig Veiga L. Design of Geodetic Monitoring Networks by Minimal Detectable Displacement Evaluation under Confidence and Sensitivity Analysis // Journal of Surveying Engineering. 2025. Vol. 151, No. 1. DOI: 10.1061/JSUED2.SUENG-1535.

22. Ma Z., Choi J., Sohn H. Structural displacement sensing techniques for civil infrastructure: A review // Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience. 2023. Vol. 2, No. 3. 100041. DOI: 10.1016/j.iintel.2023.100041.

23. Oku Topal G., Akpınar B. Determining the performance of HR-GNSS and RTS geodetic techniques for Structural Health Monitoring // Advances in Geodesy and Geoinformation. 2024. Vol. 73, No. 2. e53. DOI: 10.24425/agg.2024.146165.

24. Dai W., Li X., Yu W., Qu X., Ding X. Multi-Antenna Global Navigation Satellite System/Inertial Measurement Unit Tight Integration for Measuring Displacement and Vibration in Structural Health Monitoring // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, No. 6. 1072. DOI: 10.3390/rs16061072.

25. Urazbayev G.M., Altayeva A.A., Kozhayev Zh.T., Mustafin M.G. Geodetic monitoring of deformations of engineering structures // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources. 2021. Vol. 317, No. 2. P. 69–77. DOI: 10.31643/2021/6445.20.

26. Nguyen H.V., Pham K.C., Nguyen D.B., Nguyen L.Q. Application of the GNSS Method in the Monitoring of Mine Surface Displacement: A Systemic Review // Inżynieria Mineralna. 2024. Vol. 53, No. 2. P. 247–255. DOI: 10.29227/IM-2024-02-96.