

МРНТИ 36.01.81

<https://doi.org/10.26577/JGEM80120268>

**Т.Б. Нурпеисова^{*}, Г.С. Мадимарова^{*},
А.Е. Ормамбекова^{*}, Е.Ж. Ормамбеков^{*}**

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
^{*}e-mail: g.madimarova@satbayev.university

СПУТНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ GNSS В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

В статье рассмотрены вопросы повышения точности геодезического мониторинга деформаций гидротехнических сооружений на основе комплексного применения спутниковых GNSS-технологий и традиционных линейно-угловых измерений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасной эксплуатации уникальных гидротехнических сооружений I и II классов ответственности в условиях сложного рельефа, ограниченного радиогоризонта и воздействия сезонных температурных колебаний. Объектом исследования выбрана Усть-Каменогорская гидроэлектростанция, расположенная в сложных орографических условиях предгорной зоны Западного Алтая.

В ходе работы была создана плановая опорная геодезическая сеть, включающая пункты государственной геодезической сети, створные опорные пункты и дополнительные пункты, размещённые с учётом оптимальных условий приёма спутниковых сигналов. Полевые измерения выполнялись двухчастотными геодезическими GNSS-приёмниками в статическом режиме синхронных наблюдений с последующей обработкой дифференциальным методом и уравниванием по методу наименьших квадратов. Для уточнения результатов дополнительно использовались линейно-угловые построения и анализ геометрии сети.

Установлено, что средние квадратические ошибки определения длин базовых линий составили 0,8–1,1 мм, а после оптимизации состава угловых наблюдений точность координатных определений была повышена до 0,6–0,7 мм. Экспериментально подтверждено, что 30-минутные GNSS-сеансы при благоприятных условиях обеспечивают точность, сопоставимую с 5-часовыми наблюдениями. Показано, что комбинированное использование спутниковых приёмников и высокоточных электронных тахеометров позволяет компенсировать ограничения GNSS-методов и повысить надёжность контроля деформаций. Разработанная методика может быть рекомендована для построения систем мониторинга уникальных гидротехнических сооружений и обеспечения их эксплуатационной безопасности.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, геодезический мониторинг, GNSS, трилатерация, деформации, автоматизированные системы контроля, Усть-Каменогорская ГЭС.

**T.B. Nurpeissova, G.S. Madimarova*,
A.E. Ormambekova, E.Zh. Ormambekov**

Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan
^{*}e-mail: g.madimarova@satbayev.university

GNSS satellite technologies in monitoring systems for deformations of hydraulic structures

The article examines approaches to improving the accuracy of geodetic monitoring of deformations of hydraulic engineering structures through the integrated use of satellite GNSS technologies and traditional linear-angular measurements. The relevance of the study is determined by the need to ensure the safe operation of unique hydraulic structures of responsibility classes I and II under conditions of complex terrain, limited radio horizon, and significant seasonal temperature variations. The Ust-Kamenogorsk Hydropower Plant, located in the complex orographic conditions of the foothill zone of the Western Altai, was selected as the research object.

During the study, a horizontal geodetic control network was established, including points of the state geodetic network, alignment reference points, and additional observation points located considering optimal conditions for satellite signal reception. Field measurements were carried out using dual-frequency geodetic GNSS receivers in the static mode of synchronous observations, followed by differential data

processing and network adjustment using the least squares method. To refine the results, linear-angular measurements and analysis of the network geometry were additionally applied.

The results showed that the root mean square errors of baseline length determination ranged from 0.8 to 1.1 mm, while after optimization of angular observations the accuracy of coordinate determination increased to 0.6–0.7 mm. It was experimentally confirmed that 30-minute GNSS observation sessions under favorable conditions provide accuracy comparable to 5-hour measurements. The study also demonstrated that the combined use of GNSS receivers and high-precision electronic total stations makes it possible to compensate for the limitations of satellite measurements and improve the reliability of deformation monitoring. The developed methodology can be recommended for the design of monitoring systems for unique hydraulic engineering structures and for ensuring their operational safety.

Keywords: hydraulic structures, geodetic monitoring, GNSS, trilateration, deformations, automated control systems, Ust-Kamenogorsk HPP.

Т.Б. Нұрпейісова, Г.С. Мадимарова*,
А.Е. Ормамбекова, Е.Ж. Ормамбеков

Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті атындағы Қ.И. Сәтбаев, Алматы, Қазақстан

*e-mail: g.madimarova@satbayev.university

Гидротехникалық құрылыстардың деформацияларын бақылау жүйелеріндегі GNSS спутниктік технологиялары

Мақалада гидротехникалық құрылыстардың деформацияларын геодезиялық мониторингтеу дәлдігін арттыру мәселелері спутниктік GNSS технологияларын және дәстүрлі сызықтық-бұрыштық өлшеулерді кешенді қолдану негізінде қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі күрделі жер бедері, радиогоризонттың шектелуі және маусымдық температуралық ауытқулар жағдайында I және II жауапкершілік класына жататын бірегей гидротехникалық құрылыстарды қауіпсіз пайдалануды қамтамасыз ету қажеттілігімен анықталады. Зерттеу нысаны ретінде Батыс Алтайдың тауалды аймағындағы күрделі орографиялық жағдайда орналасқан Өскемен гидроэлектр станциясы таңдалды.

Зерттеу барысында мемлекеттік геодезиялық желі пункттерін, створлық тірек пункттерін және спутниктік сигналдарды қабылдауға қолайлы жағдайларды ескере отырып орналастырылған қосымша бақылау пункттерін қамтитын жоспарлық тірек геодезиялық желі құрылды. Далалық өлшеулер екі жиілікті геодезиялық GNSS қабылдағыштарын қолдана отырып, синхронды бақылаулардың статикалық режимінде жүргізілді. Алынған деректер дифференциалдық әдіспен өңделіп, ең кіші квадраттар әдісі арқылы желі теңестірілді. Нәтижелерді нақтылау мақсатында сызықтық-бұрыштық өлшеулер және желінің геометриялық құрылымын талдау қосымша қолданылды.

Зерттеу нәтижелері базалық сызықтардың ұзындықтарын анықтаудың орташа квадраттық қателіктері 0,8–1,1 мм аралығында екенін көрсетті, ал бұрыштық бақылаулар құрамын оңтайландырғаннан кейін координаталарды анықтау дәлдігі 0,6–0,7 мм деңгейіне дейін артты. Эксперименттік түрде қолайлы жағдайларда 30 минуттық GNSS бақылау сеанстары 5 сағаттық өлшеулермен салыстырмалы дәлдік беретіндігі дәлелденді. Сонымен қатар спутниктік қабылдағыштарды жоғары дәлдікті электрондық тахеометрлермен бірге қолдану GNSS әдістерінің шектеулерін өтеуге және деформациялық бақылаудың сенімділігін арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Ұсынылған әдістеме бірегей гидротехникалық құрылыстарды мониторингтеу жүйелерін жобалау кезінде қолдануға және олардың қауіпсіз пайдаланылуын қамтамасыз етуге ұсынылады.

Түйін сөздер: гидротехникалық құрылыстар, геодезиялық мониторинг, GNSS, трилатерация, деформациялар, бақылаудың автоматтандырылған жүйелері, Өскемен ГЭС.

Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) является приоритетной задачей в условиях возрастающих техногенных и природных нагрузок. Особую актуальность приобретает контроль пространственных деформаций сооружений I и II классов ответственности, для которых нормативными документами предусмотрено применение авто-

матизированных информационно-диагностических систем мониторинга.

Современные тенденции развития геодезического приборостроения связаны с широким внедрением спутниковых технологий позиционирования (GNSS), обеспечивающих непрерывность наблюдений, автоматизацию обработки данных и высокую точность определения координат (Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС, 2008; Yu J., 2016). Однако в условиях сложного

рельефа, ограниченного радиогоризонта и повышенных требований к точности мониторинга применение исключительно спутниковых методов не всегда обеспечивает необходимый уровень достоверности результатов.

Целью настоящего исследования является анализ эффективности применения спутниковых GNSS-технологий в сочетании с традиционными линейно-угловыми построениями для повышения точности определения координат опорных пунктов и параметров деформаций гидротехнических сооружений, а также разработка рекомендаций по построению оптимальной геодезической сети мониторинга.

Материалы и методы исследования

Сведения об объекте

Усть-Каменогорская ГЭС по своим технико-эксплуатационным характеристикам относится к категории уникальных гидротехнических сооружений. Гидроузел расположен на левом берегу реки Иртыш, в предгорной зоне Западного Алтая, приблизительно в 12 км выше города Усть-Каменогорска. В районе размещения шахт-

ного шлюза рельеф отличается значительной расчленённостью: перепад отметок достигает 120 м. Расстояние от шлюза до русла р. Иртыш составляет около 220 м.

Усть-Каменогорская ГЭС относится к уникальным гидротехническим сооружениям с высоконапорным шахтным шлюзом ($H = 42$ м), расположенным в горной местности с перепадом высот до 120 м и значительными сезонными температурными колебаниями. Конструктивные особенности и условия эксплуатации обуславливают необходимость высокоточного контроля осадок и горизонтальных смещений сооружений (Reguzzoni, 2022; Tretyak, 2025).

Речная стенка шлюза выполнена из железобетона, при этом примерно 30 % её протяжённости размещено в скальном основании. Береговая стенка также железобетонная и полностью опирается на скальный массив. Территория характеризуется резко континентальным климатом: среднегодовая температура воздуха составляет $+2,7$ °C, а среднегодовая амплитуда температур достигает $37,8$ °C, что обуславливает значительные сезонные температурные деформации конструкций.

Рисунок 1

Усть-Каменогорская ГЭС



Примечание: составлено автором.

Методы исследования

Исследование выполнено на базе геодезической службы Усть-Каменогорской ГЭС с целью оценки эффективности применения спутнико-

вых GNSS-технологий при мониторинге деформаций гидротехнических сооружений.

Для осуществления контроля пространственных перемещений была создана плановая

опорная геодезическая сеть, в состав которой вошли: существующие исходные пункты государственной геодезической сети (ГГС), створные опорные пункты, размещённые в участках с оптимальными условиями приёма спутниковых сигналов, а также дополнительные кустовые пункты, заложенные на расстоянии 10–50 м от базовых точек.

Проектирование геодезической сети выполнялось с учётом требований обеспечения миллиметровой точности координатных определений и сокращения протяжённости базовых линий.

Для повышения геометрической устойчивости и точностных характеристик сети применён принцип спутниковой трилатерации с предварительным анализом конфигурации сети и оценкой ожидаемой точности в программном комплексе CREDO.

Полевые измерения проводились специализированными двухчастотными геодезическими GNSS-приёмниками в статическом режиме наблюдений. Использовалась методика синхронных измерений, предусматривающая одновременную регистрацию сигналов не менее чем от четырёх одинаковых спутников на всех пунктах сети.

Продолжительность сеансов наблюдений составляла 30 минут при благоприятных условиях приёма спутниковых сигналов и увеличивалась до 5 часов при выполнении контрольных и сравнительных измерений.

Определялись не абсолютные координаты отдельных пунктов, а приращения пространственных координат между синхронно работающими приёмниками, что позволило снизить влияние систематических ошибок.

Обработка данных осуществлялась с использованием дифференциального метода и последующего уравнивания сети методом наименьших квадратов.

Выполнялись замкнутые линейно-угловые построения в осенне-зимний периоды с целью учёта сезонных температурных воздействий.

Анализ конфигурации геодезической сети предусматривает исследование влияния угловых измерений на итоговую точность координатных определений, экспериментальное исключение отдельных направлений, а также повторное уравнивание наблюдений с целью выбора оптимальной схемы измерений.

Оценка точности определения координат выполнялась по значениям средних квадратических ошибок (СКО) длин базовых линий, по СКО координат пунктов, полученных в резуль-

тате уравнивания сети, а также на основе анализа уклонений одноимённых сеансов наблюдений. (Xi, 2020)

Кроме того, проводилась оценка эффективности синхронных измерений с использованием нескольких комплектов GNSS-приёмников для определения возможности повышения точности координатных определений.

В исследованиях (Yang, 2019) рассмотрены вопросы обоснования применения технологии спутникового позиционирования для сгущения государственной геодезической сети (ГГС) и формирования надёжной геодезической основы мониторинга гидротехнических сооружений в условиях сложных геоморфологических и инженерно-геологических условий района Усть-Каменогорской ГЭС. Авторами отмечено, что использование глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) позволяет существенно повысить экономическую эффективность геодезических работ, сократить сроки их выполнения и обеспечить высокую точность определения координат пунктов наблюдательной сети при рациональной организации спутниковых измерений. (Xi, 2018) Высокая точность спутниковых измерений, возможность автоматизации наблюдений и оперативность получения результатов делают GNSS-методы эффективным инструментом для контроля устойчивости плотин и гидроузлов, а также для своевременного выявления опасных деформационных процессов.

Помимо создания геодезической основы для строительства канала, в состав общего комплекса геодезических работ входит также систематическое определение деформаций отдельных элементов сооружений. Для выявления абсолютных смещений конструкций гидротехнических сооружений, в частности бетонных плотин, в настоящее время преимущественно применяют линейно-угловые построения (Мадимарова, 2021).

На начальных этапах эксплуатации наблюдения в деформационных геодезических сетях выполнялись преимущественно методом триангуляции. С внедрением высокоточных светодальномеров и электронных тахеометров угловые измерения стали дополняться линейными, что позволило повысить точность вычисления координат пунктов сети. Степень повышения точности определяется конфигурацией сети, её геометрией и длинами сторон. При этом дальнейшее улучшение точностных характеристик невозможно без оптимизации формы сети, увеличения числа исходных пунктов или сокращения протяжённости измеряемых линий.

Для ряда гидротехнических сооружений установлено, что точность определения координат может быть дополнительно повышена за счёт корректировки методики измерений, в том числе путём исключения избыточных угловых наблюдений. Погрешность измерения направления между циклами до 1" на расстояниях порядка 1 км способна вызвать смещение взаимного положения опорных пунктов на 5 мм и более. В таких случаях предпочтение может быть отдано трилатерации, дополненной ограниченным числом угловых измерений сопоставимой точности с линейными.

На рисунке 2 представлена схема гидротехнической триангуляционной сети, в которой дополнительно измерены все стороны (Wang, 2020). Согласно предварительному расчёту точности, выполненному в программном комплексе CREDO, средние квадратические погрешности определения положения пунктов А, Б и В, закрепляющих створы на здании ГЭС и водосливной плотине, не превышают 1 мм.

По результатам уравнивания наблюдений средние квадратические ошибки определения координат опорных пунктов составили: для пункта А – 0,9 мм, для пункта В – 1,3 мм, для пункта С – 1,1 мм, для пункта Д – 1,0 мм, для пункта

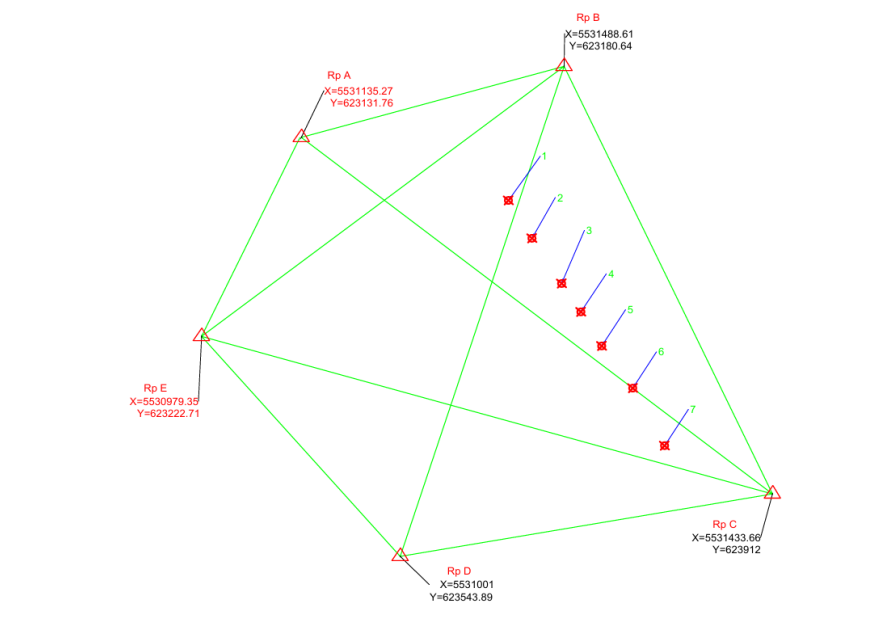
Е – 1,2 мм, что соответствует допустимым нормативным значениям.

Анализ предварительной обработки угловых измерений позволил выявить снижение точности измерения направлений на пункте Б по сравнению с другими пунктами сети. После исключения угловых наблюдений на данном пункте и повторного уравнивания были получены следующие значения СКО: 0,7 мм для пункта А, 0,6 мм для пункта В, 0,6 мм для пункта С, 0,6 мм для пункта Д и 0,7 мм для пункта Е. Таким образом, оптимизация состава наблюдений позволила повысить точность определения координат, что подтверждает необходимость тщательного анализа структуры сети и качества исходных измерений (Scaioni M., 2018).

Для оценки деформационного состояния гидротехнических сооружений, включая Усть-Каменогорскую ГЭС, и обеспечения их безопасной эксплуатации выполняется комплекс натурных геодезических наблюдений. Методика измерений постоянно совершенствуется, особенно с развитием спутниковых технологий GNSS, позволяющих повысить оперативность, автоматизацию и точность мониторинга пространственных смещений сооружений.

Рисунок 2

Схема геодезической сети Усть-Каменогорской ГЭС



Условные обозначения:

Δ – исходный пункт сети; • – опорный пункт створа

Примечание: составлено автором.

В ряде случаев получение требуемой точности спутниковых измерений затруднено вследствие действия трёх основных факторов. Во-первых, опорные пункты (1–7) должны располагаться строго в створе, что накладывает ограничения на их пространственное размещение. Во-вторых, необходимо обеспечить открытый радиогоризонт в течение всего сеанса наблюдений для приёма сигналов достаточного количества спутников GNSS. (Meng, 2007) В-третьих, заявленная изготовителями паспортная точность спутниковых приёмников не всегда оказывается достаточной для мониторинга отдельных сооружений с повышенными требованиями к точности (Li, 2020).

В подобных условиях требуемая точность определения координат, например при контроле горизонтальных смещений гидротехнических сооружений, может быть обеспечена, по нашему мнению, за счёт совместного применения спутниковых геодезических приёмников и высоко-

точных автоматизированных электронных тахеометров (Psimoulis, 2008)

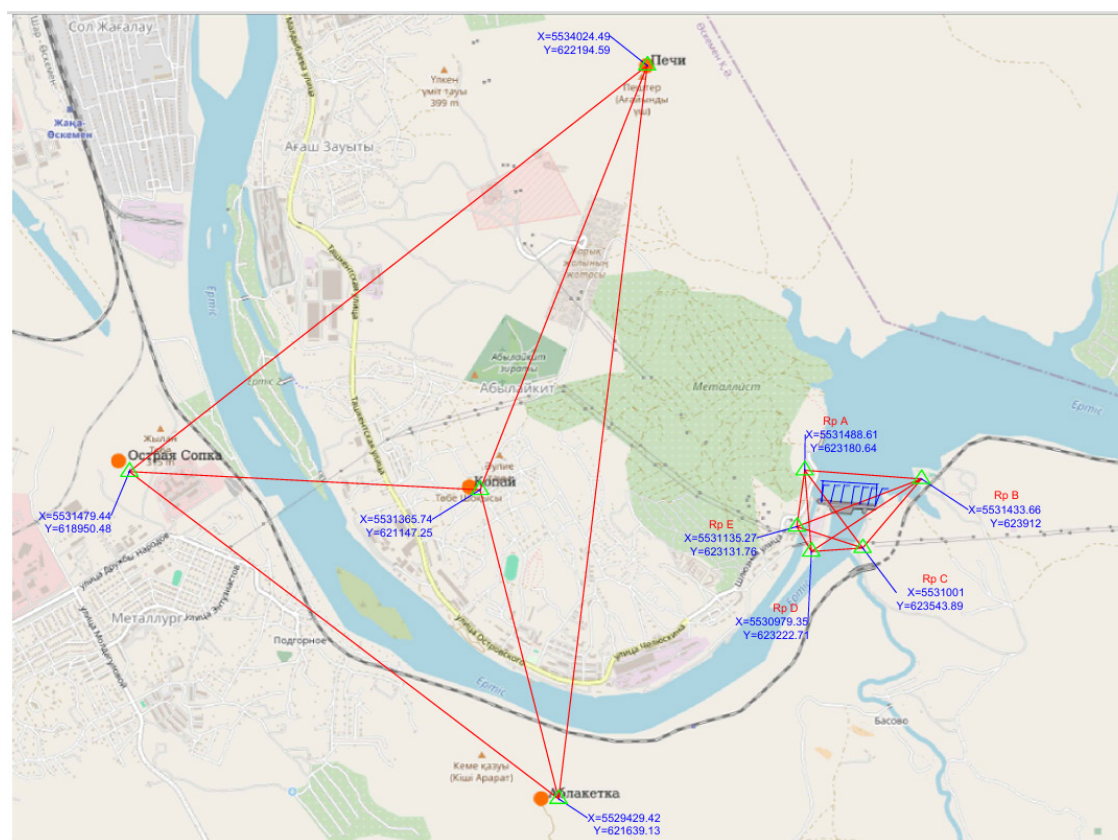
На 3 рисунке показана схема размещения пунктов геодезической сети GNSS, предназначенной для проведения высокоточных спутниковых наблюдений и формирования планово-высотного обоснования.

На картографической основе отображена исследуемая территория с элементами местности: река, дорожная сеть, населённые пункты и природные объекты. В пределах территории установлены геодезические пункты наблюдений, обозначенные специальными маркерами и подписями координатных пунктов.

Пункты сети соединены красными линиями, которые отражают базовые линии GNSS-измерений между пунктами. Такая конфигурация образует систему треугольников, обеспечивающую геометрическую устойчивость и высокую точность уравнивания сети.

Рисунок 3

Схема размещения пунктов геодезического мониторинга и конфигурации спутниковых базовых линий.



Примечание: составлено автором.

Схема иллюстрирует пространственное размещение опорных и рабочих пунктов геодезической сети на исследуемой территории. На чертеже также представлена геометрическая конфигурация наблюдений, сформированная по принципу триангуляционно-трилатерационной структуры, обеспечивающей необходимую геометрическую устойчивость сети. Кроме того, отображены взаимные базовые линии спутниковых измерений, соединяющие пункты наблюдений и формирующие систему пространственных связей между ними. Расположение пунктов по обе стороны водного объекта обеспечивает повышение устойчивости сети и создаёт условия для контроля возможных пространственных деформаций исследуемой территории (Мадимарова Г.С., 2021; Nurpeissova M, 2020).

В правой части схемы показан локальный сгущённый участок сети, где пункты расположены более компактно и образуют несколько замкнутых фигур. Такая конфигурация используется для повышения точности координат при детальном мониторинге (Yi, 2013).

В левой и центральной частях сети размещены удалённые опорные пункты, формирующие длинные базовые линии. Они выполняют функцию жёсткого геодезического каркаса, необходимого для обеспечения устойчивости всей сети и последующего уравнивания измерений.

Таким образом, представленная схема отражает структуру геодезической GNSS-сети, обеспечивающей миллиметровую точность определения координат пунктов и возможность последующего анализа деформационных процессов на исследуемой территории.

Следует отметить, что пункты существующих геодезических сетей на гидроэлектростанциях, как правило, закладывались для традиционных методов наблюдений и в большинстве случаев малопригодны для организации сеансов GNSS-измерений, особенно это касается створных опорных пунктов. В связи с этим для реализации преимуществ спутниковых технологий, включая отсутствие необходимости прямой видимости между пунктами, целесообразна реконструкция существующих схем сетей.

Результаты

В ходе выполненных геодезических работ на Усть-Каменогорской ГЭС создана опорная плановая сеть, предназначенная для мониторинга горизонтальных и вертикальных смещений

конструктивных элементов гидротехнического сооружения. Координаты опорных пунктов определены с применением спутниковых GNSS-приёмников с последующим уравниванием измерений.

По результатам обработки базовых линий установлено, что средние квадратические ошибки (СКО), вычисленные по отклонениям от среднего значения длин линий для различных пар приёмников, составили от 0,8 до 1,1 мм, что соответствует требованиям к деформационным наблюдениям на сооружениях I класса ответственности.

Анализ одноимённых сеансов показал наличие разнонаправленных отклонений, что подтверждает преимущественно случайный характер ошибок измерений. Это позволило сделать вывод о возможности дополнительного повышения точности при организации синхронных измерений тремя и более комплектами GNSS-приёмников.

Экспериментально установлено, что при благоприятных условиях приёма спутниковых сигналов 30-минутные сеансы наблюдений обеспечивают точность определения длин базовых линий, сопоставимую с результатами 5-часовых измерений. Данный результат имеет практическое значение для эксплуатации сооружений в условиях ограниченного времени проведения наблюдений и плотной застройки территории гидроузла.

При определении координат опорных пунктов получены следующие точностные характеристики:

- СКО определения координат пунктов по результатам уравнивания составили менее 1 мм;
- среднеквадратические ошибки определения пространственных координат без применения металлического диска составили: $X = 0,0034$ м; $Y = 0,0026$ м; $Z = 0,0068$ м.

Полученные значения подтверждают возможность достижения миллиметрового уровня точности при условии соблюдения требований к синхронности измерений и количеству одновременно наблюдаемых спутников.

Дополнительно установлено, что исключение избыточных угловых измерений в линейно-угловых построениях способствует повышению точности координатных определений. Повторное уравнивание сети после оптимизации состава наблюдений позволило снизить СКО определения координат до 0,6–0,7 мм, что подтверждает целесообразность комбинированного

применения спутниковых и наземных тахеометрических измерений.

Создание геодезической сети на основе GNSS-технологий позволило:

- сократить временные затраты на определение координат одной точки в 10–15 раз по сравнению с традиционными методами;
- повысить надёжность контроля деформаций за счёт синхронных измерений;
- обеспечить непрерывность мониторинга в режиме реального времени и при постобработке данных;
- исключить необходимость прямой оптической видимости между реперами.

В результате исследований подтверждена эффективность применения спутниковой трилатерации при проектировании оптимальной плановой геодезической сети для мониторинга деформационных процессов гидротехнических сооружений в сложных орографических условиях.

Спутниковые измерения применимы как для определения осадок, так и для оценки горизонтальных перемещений сооружений. Их основным преимуществом является возможность непрерывного мониторинга – как в режиме реального времени, так и с последующей постоб-

работкой, что существенно расширяет возможности анализа деформационных процессов и повышает оперативность принятия инженерных решений.

На рисунке 4 представлена схема выполнения измерений на пунктах ГГС RpA, RpB, RpC, RpD и RpE при определении координат опорных пунктов 1–7, размещённых в зонах с наиболее благоприятными условиями для спутниковых наблюдений. Рассматривается наиболее неблагоприятная ситуация, когда на ранее заложенных створных опорных пунктах невозможно обеспечить требуемое качество GNSS-измерений (например, вследствие ограниченного радиогоризонта или экранирования сигналов).

В подобных условиях рекомендуется переносить измерения на специально выбранные пункты с оптимальными условиями приёма сигналов спутниковых навигационных систем. Для обеспечения максимально равной и однородной точности определения базовых линий целесообразно выполнять спутниковые измерения на всех пунктах сети одновременно, что позволяет минимизировать влияние временных факторов и повысить согласованность результатов уравнивания сети.

Рисунок 4
Схема измерений на пунктах ГГС



Примечание: составлено автором.

Для эффективного контроля деформационных процессов требуется обеспечение максимально возможной точности определения параметров смещений. В связи с этим при выполнении наблюдений должны применяться специализированные высокоточные геодезические приёмники спутниковых сигналов и соответствующие антенны, предназначенные для деформационного мониторинга и геодинамических исследований.

Применение указанных методик обеспечивает регламентированную точность измерений,

корректную организацию наблюдательных циклов, а также соблюдение требований к обработке и интерпретации спутниковых данных.

В результате выполненных геодезических работ геодезическая служба Усть-Каменогорской ГЭС была обеспечена системой опорных пунктов, координаты которых определены с высокой точностью и приведены в табл. 1. Созданная опорная сеть формирует надёжную пространственную основу для дальнейшего мониторинга деформаций сооружений и оценки их геодинамического состояния в процессе эксплуатации.

Таблица 1

Определённые координаты опорных пунктов

Название пунктов	Координаты	
	X	Y
1	5531294.95	623285.92
2	5531294.11	623345.4
3	5531290.15	623407.18
4	5531285.81	623473.8
5	5531280.18	623527.62
6	5531276.53	623578.05
7	5531273.13	623624.5

Примечание: составлено автором.

Установлено, что при благоприятных условиях наблюдений точность определения длин линий за 30-минутный сеанс практически сопоставима с точностью, получаемой при 5-часовых измерениях. Это обстоятельство имеет принципиальное значение при выполнении наблюдений на застроенных площадках гидроузлов, где продолжительные сеансы затруднены технологическими и эксплуатационными факторами. Рассматриваемая методика, после проведения дополнительных исследований для различных диапазонов длин базовых линий, может быть рекомендована для применения при мониторинге деформационных процессов гидротехнических сооружений, включая Усть-Каменогорскую ГЭС.

Таким образом, создание геодезической сети с использованием спутниковых приёмников GNSS при выполнении строительных и мониторинговых работ позволило сократить временные затраты на определение координат в расчёте на одну точку в 10–15 раз, одновременно повысив точность определения координат опорных пунктов.

Название пунктов	Координаты	
	X	Y
A	5531135.27	623131.76
B	531488.61	623180.64
C	5531433.66	62391
D	5531001	623543.89
E	5530979.35	623222.71

Современные технологические возможности геодезических спутниковых систем обеспечивают определение положения пункта, оснащённого приёмником спутниковых сигналов, с высокой степенью точности. Координаты спутников известны с высокой точностью, что формирует в околоземном пространстве динамическую пространственную сеть опорных точек с известными координатами.

Для достижения требуемой точности маркшейдерско-геодезических измерений целесообразно определять не абсолютные координаты отдельного пункта, а приращения пространственных координат между двумя синхронно функционирующими приёмниками. При этом оба приёмника должны одновременно принимать сигналы не менее чем от четырёх одних и тех же спутников. Зарегистрированные данные передаются в вычислительный комплекс для совместной обработки, в результате которой определяются приращения координат между реперами.

Совершенствование инструментальных методов наблюдений на основе применения глобальных навигационных спутниковых систем

(GNSS) является одним из наиболее эффективных способов контроля деформационных процессов. Использование спутниковых технологий позволило фиксировать смещения в любое время суток, при различных погодных условиях и при отсутствии прямой оптической видимости между реперами. При этом среднеквадратические ошибки измерений (без использования металлического диска) составляют: $X = 0,0034$ м; $Y = 0,0026$ м; $Z = 0,0068$ м.

Для проверки предположения о повышении точности определения смещений опорных пунктов, установленных на Усть-Каменогорской ГЭС, выполнены экспериментальные наблюдения двумя GNSS-приёмниками, размещёнными в одном створе.

В целях дальнейшего повышения точности предлагается построение оптимальной плано-

вой геодезической сети методом спутниковой трилатерации с предварительным проектированием положения створных вспомогательных пунктов, с которых впоследствии выполняются линейно-угловые измерения высокоточными электронными тахеометрами. Такой комплексный подход позволяет обеспечить требуемую метрологическую надёжность при мониторинге деформаций уникальных гидротехнических сооружений.

Для оценки точности измерений при длительности сеанса 30 минут выполнены измерения комплектом из четырёх приёмников *Trimble 5700*. При этом контрольный приёмник в течение 5-часового сеанса не перемещался. Сеанс наблюдений был разбит на 30-минутные интервалы для вычисления базовых линий. Результаты вычислений длин линий приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения длин базовых линий

N/N Марки измерений	Координаты								
	Ноябрь 2025			Декабрь 2025			Январь 2026		
	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
Марка №1	5531294.950	623285.920	345.527	5531294.955	623285.924	345.525	5531294.952	623285.922	345.527
Марка №2	5531294.110	623345.400	345.585	5531294.108	623345.397	345.584	5531294.108	623345.398	345.585
Марка №3	5531290.150	623407.180	345.565	5531290.152	623407.183	345.567	5531290.149	623407.177	345.564
Марка №4	5531285.810	623473.800	345.518	5531285.808	623473.803	345.522	5531285.812	623473.801	345.520
Марка №5	5531280.180	623527.620	345.523	5531280.177	623527.619	345.524	5531280.181	623527.618	345.523
Марка №6	5531276.530	623578.050	345.537	5531276.531	623578.052	345.536	5531276.529	623578.049	345.535
Марка №7	55312763.130	623624.560	345.554	5531273.131	623624.561	345.555	5531273.128	623624.559	345.555

Примечание: составлено автором.

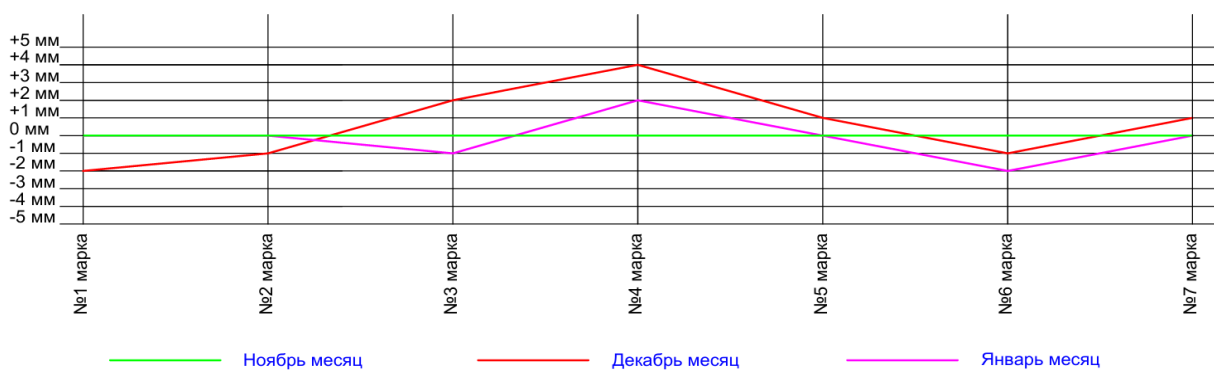
По данным трёх циклам наблюдений (ноябрь–декабрь–январь) установлены:

- Амплитуда горизонтальных смещений, которая составляет от $-2,5$ мм до $+3,5$ мм.
- Вертикальные отметки изменяются незначительно – в пределах $\pm 1-2$ мм.
- Максимальные отклонения зафиксированы в декабре.
- В январе наблюдается частичное возвратное перераспределение деформаций.

На рисунке 5 представлен график изменений длин линий между циклами измерений. Максимальные приращения длин линий между смежными циклами соответствуют интервалам с большим значением геометрического

фактора, близким к предельному значению ($PDOP > 5$).

По результатам обработки полученных данных установлено, что средние квадратические ошибки, определённые по уклонам от среднего значения длин базовых линий, для различных пар приёмников составили от $0,8$ до $1,1$ мм. Наличие сравнительно значительных различий в уклонах в одноимённых сеансах, а также различный знак отклонений свидетельствуют о случайном характере ошибок и позволяют предположить возможность повышения точности определения смещений при организации синхронных измерений тремя и более комплектами приёмников.

Рисунок 5*График изменений длин линий между циклами измерений**Примечание: составлено автором.*

Обсуждение результатов

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения спутниковых GNSS-технологий для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений в сложных ортографических условиях.

Средние квадратические ошибки определения длин базовых линий в пределах 0,8–1,1 мм свидетельствуют о достижении миллиметрового уровня точности, необходимого для контроля горизонтальных смещений сооружений I класса ответственности. При этом выявлено, что разнонаправленные уклонения в одноимённых сеансах носят случайный характер, что открывает возможность дальнейшего повышения точности за счёт синхронных измерений тремя и более комплектами приёмников.

Экспериментально установлено, что при благоприятных условиях 30-минутные сеансы обеспечивают точность, сопоставимую с 5-часовыми измерениями. Это имеет важное практическое значение, поскольку позволяет существенно сократить время наблюдений без потери метрологической надёжности.

Анализ структуры линейно-угловой сети показал, что избыточные угловые измерения могут снижать итоговую точность координатных определений. Исключение отдельных направлений и переход к схеме спутниковой трилатерации позволили уменьшить СКО координат до 0,6–0,7 мм, что подтверждает целесообразность оптимизации конфигурации сети.

Совместное применение GNSS-приёмников и высокоточных электронных тахеометров по-

зволило компенсировать ограничения спутниковых измерений, обусловленные сложным рельефом, частичным закрытием горизонта и конструктивными особенностями сооружения. Интегрированный подход обеспечивает устойчивость сети, контроль стабильности исходных пунктов и повышение надёжности определения деформационных параметров.

Таким образом, разработанная методика построения оптимальной плановой геодезической сети на основе спутниковой трилатерации в сочетании с линейно-угловыми измерениями может быть рекомендована для внедрения в системах мониторинга уникальных гидротехнических сооружений, обеспечивая требуемый уровень точности и эксплуатационной безопасности.

Выводы

Выполненные исследования показали, что применение спутниковых GNSS-технологий при создании геодезической основы мониторинга гидротехнических сооружений позволяет существенно повысить эффективность и оперативность наблюдений. Создание опорной сети на Усть-Каменогорской ГЭС обеспечило получение координат пунктов с миллиметровой точностью, при этом временные затраты на определение координат одной точки были сокращены в 10–15 раз по сравнению с традиционными методами.

Анализ средних квадратических ошибок измерений показал, что при синхронных наблюдениях несколькими приемниками возможно достижение точности определения базовых линий

на уровне 0,8–1,1 мм. Экспериментально подтверждено, что кратковременные (30-минутные) сеансы при благоприятных условиях обеспечивают точность, сопоставимую с продолжительными измерениями.

Установлено, что оптимизация структуры сети, исключение избыточных угловых наблюдений и применение метода спутниковой трилатерации способствуют дополнительному повышению точности координатных определений. Совместное использование GNSS-приемников и высокоточных электронных тахеометров позволяет компенсировать ограничения спутниковых измерений, обусловленные особенностями рельефа и условиями приема сигналов.

Разработанные рекомендации по построению оптимальной плановой геодезической сети могут быть использованы при проектировании систем мониторинга деформаций уникальных гидротехнических сооружений и обеспечивают требуемую метрологическую надежность контроля их технического состояния в процессе эксплуатации.

По результатам трёхкратного цикла геодезических наблюдений установлено, что, текущее состояние объекта можно оценить как удовлетворительное и конструктивно устойчивое, без признаков развития опасных деформационных процессов.

Благодарность

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета Науки Министерства науки и высшего образования РК (ГФ ИРН № АР26198837 «Геотехнический мониторинг зданий и сооружений в сейсмически опасных регионах путем разработки инновационных методов и средств наблюдения, обеспечивающих безопасность их эксплуатации»).

Вклад авторов:

Концептуализация – Нурпеисова Т.Б. и Мадимарова Г.С.; Методология – Нурпеисова Т.Б. и Мадимарова Г.С. Программное обеспечение – Ормамбеков Е.Ж.; Валидация – Нурпеисова Т.Б., Мадимарова Г.С. и Ормамбекова А.Е.; Формальный анализ – Ормамбекова А.Е.; Исследование – Нурпеисова Т.Б. и Мадимарова Г.С.; Ресурсы – Ормамбеков Е.Ж.; Курирование данных – Ормамбекова А.Е.; Написание – подготовка первоначального варианта – Ормамбекова А.Е.; Написание – рецензирование и редактирование – Нурпеисова Т.Б.; Визуализация – Ормамбеков Е.Ж.; Научное руководство – Нурпеисова Т.Б.; Администрирование проекта – Нурпеисова Т.Б.; Привлечение финансирования – Нурпеисова Т.Б.

Литература

- Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. (2008). *Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования* (СТО 17330282.27.140.003-2008). <https://meganorm.ru/Data2/1/4293830/4293830877.htm>
- Li, B., Yang, J., & Hu, D. (2020). Methods for analyzing dam monitoring data: A literature review. *Structural Control and Health Monitoring*, 27, e2501. <https://doi.org/10.1002/stc.2501>
- Мадимарова, Г. С., Сулейменова, Д. Н., & Жантуева, Ш. А. (2021). Геодезическое обеспечение при реконструкции и восстановлении плотины на реке Кызылагаш. *The Scientific Heritage*, 1(76), 68–72.
- Мадимарова, Г. С., Сәрсенханов, М. М., & Оспан, К. М. (2021). Геодезический мониторинг при строительстве плотины на реке Кызылагаш. В *Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых* (с. 98–100).
- Meng, X., Dodson, A., & Roberts, G. W. (2007). Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers. *Engineering Structures*, 29, 3178–3184. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.012>
- Nurpeissova, M., Schultz, R., & Myngzhasarov, B. (2020). Geodetic support for marine channel construction. В *Ways of science development in modern crisis conditions* (с. 74–77).
- Psimoulis, P. A., & Stiros, S. C. (2008). Experimental assessment of GPS and RTS accuracy for monitoring structural oscillations. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23, 389–403. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00551.x>
- Reguzzoni, M., Rossi, L., De Gaetani, C. I., Caldera, S., & Barzaghi, R. (2022). GNSS-based dam monitoring: A case study using time series analysis. *Applied Sciences*, 12(19), 9981. <https://doi.org/10.3390/app12199981>
- Scaioni, M., Marsella, M., Crosetto, M., Tornatore, V., & Wang, J. (2018). Geodetic and remote sensors for dam deformation monitoring. *Sensors*, 18(11), 3682. <https://doi.org/10.3390/s18113682>
- Tretyak, K., & Kukhtar, D. (2025). Analysis of GNSS, InSAR, and robotic total station time series in monitoring vertical displacements of the Dniester HPP dam. *Geomatics*, 5(4), 73. <https://doi.org/10.3390/geomatics5040073>
- Wang, Y., Shen, D., Chen, J., Pei, L., Li, Y., Lu, X., & Zhang, L. (2020). Research and application of an intelligent deformation monitoring system for dams and slopes. *Advances in Civil Engineering*, 9709417. <https://doi.org/10.1155/2020/9709417>
- Xi, R., Chen, H., Meng, X., Jiang, W., & Chen, Q. (2018). Reliable dynamic monitoring of bridges using integrated GPS and BeiDou systems. *Journal of Surveying Engineering*, 144, 04018008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000263](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000263)

- Xi, R., Meng, X., Jiang, W., An, X., He, Q., & Chen, Q. (2020). An improved stochastic model based on signal-to-noise ratio. *Remote Sensing*, 12, 493. <https://doi.org/10.3390/rs12030493>
- Yang, Y., Zheng, Y., Yu, W., Chen, W., & Weng, D. (2019). Deformation monitoring using GNSS-R technology. *Advances in Space Research*, 63(10), 3303–3314. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.033>
- Yi, T., Li, H., & Gu, M. (2013). Experimental assessment of high-rate GPS receivers for bridge deformation monitoring. *Measurement*, 46, 420–432. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.07.018>
- Yu, J., Yan, B., Meng, X., Shao, X., & Ye, H. (2016). Measuring dynamic characteristics of bridges using real-time kinematic GNSS. *Journal of Surveying Engineering*, 142, 04015013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000167](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000167)

References

- Гидротехнические сооружения GES и GAES. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования [Hydraulic structures of HPP and PSPP. Organization of operation and maintenance. Standards and requirements]. STO – стандарт организации. 17330282.27.140.003-2008. <https://meganorm.ru/Data2/1/4293830/4293830877.htm> (in Russian)
- Li, B.; Yang, J.; Hu, D. (2020) Dam monitoring data analysis methods: A literature review. *Structural Control and Health Monitoring*. 2020;27:e2501. DOI: 10.1002/stc.2501 Link: <https://doi.org/10.1002/stc.2501> (in English)
- Мадимарова Г.С., Сарсенханов М.М., Оспан К.М. [2021] Геодзическое обеспечение при реконструкции и восстановлении плотин на реке Кызылагаш [Geodetic support during the reconstruction and restoration of the dam on the Kyzylagash River]. II international scientific and Practical Conference “current problems of modern science: young students “Donbass State Technical Institute, state educational institution of Higher Education. 18 March 2021 G. 98-100 Luganskaya Narodnaya Republic. UDC669.1+658+621,7+622+53+519+378+372+33+004 A43. (in Russian language)
- Мадимарова Г.С., Сuleymenova D.N., Zhantueva Sh.A. (2021) Геодзический мониторинг при строител’стве плотины на реке Кызылагаш [Geodetic Monitoring during the Construction of the Dam on the Kyzylagash River]. The scientific heritage, vol 1, No. 76, P 68-72, ISSN 9215-0365 Rinz, DOI | Hungary. Scientific journal. 14.10.2021. (in Russian language)
- Meng, X.; Dodson, A.; Roberts, G.W. Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers. *Eng. Struct.* 2007, 29, 3178–3184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.012> (in English)
- Nurpeissova M, Schultz R., Myngzhasarov B. (2020) Geodetic construction support of the sea channel// Way Science “Ways of science development in modern crisis conditions” 2020 G. S. 74-77. (in English)
- Psimoulis, P.A.; Stiros, S.C. (2008) Experimental assessment of the accuracy of GPS and RTS for the determination of the parameters of oscillation of major structures. *Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 2008, 23, 389–403. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00551.x> (in English)
- Reguzzoni, M.; Rossi, L.; De Gaetani, C.I.; Caldera, S.; Barzaghi, R. (2022) GNSS-Based Dam Monitoring: The Application of a Statistical Approach for Time Series Analysis to a Case Study. *Applied Sciences*. 12(19):9981. DOI: 10.3390/app12199981 Link: <https://doi.org/10.3390/app12199981> (in English)
- Scaioni, M.; Marsella, M.; Crosetto, M.; Tornatore, V.; Wang, J. (2018) Geodetic and remote-sensing sensors for dam deformation monitoring. *Sensors*18(11):3682. DOI: 10.3390/s18113682 Link: <https://doi.org/10.3390/s18113682> (in English)
- Tretyak, K.; Kukhtar, D. (2025) Time Series Analysis of GNSS, InSAR, and Robotic Total Station Measurements for Monitoring Vertical Displacements of the Dniester HPP Dam (Ukraine). *Geomatics*. 2025;5(4):73. DOI: 10.3390/geomatics5040073 Link: <https://doi.org/10.3390/geomatics5040073> (in English)
- Wang, Y.; Shen, D.; Chen, J.; Pei, L.; Li, Y.; Lu, X.; Zhang, L. Research and Application of a Smart Monitoring System to Monitor the Deformation of a Dam and a Slope. *Advances in Civil Engineering*; 2020:9709417. DOI: 10.1155/2020/9709417 Link: <https://doi.org/10.1155/2020/9709417> (in English)
- Xi, R.; Chen, H.; Meng, X.; Jiang, W.; Chen, Q. (2018) Reliable dynamic monitoring of bridges with integrated GPS and BeiDou. *J. Surv. Eng.* 2018, 144, 04018008. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000263
- Xi, R.; Meng, X.; Jiang, W.; An, X.; He, Q.; Chen, Q. (2020) A refined SNR based stochastic model to reduce site-dependent effects. *Remote Sens.* 12, 493. <https://doi.org/10.3390/rs12030493>
- Yang, Y.; Zheng, Y.; Yu, W.; Chen, W.; Weng, D. (2019) Deformation monitoring using GNSS-R technology. *Advances in Space Research*. 2019;63(10):3303–3314. DOI: 10.1016/j.asr.2019.01.033 Link: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.033> (in English)
- Yi, T.; Li, H.; Gu, M. (2013) Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge. *Measurement*, 46, 420–432. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.07.018>
- Yu, J.; Yan, B.; Meng, X.; Shao, X.; Ye, H. (2016) Measurement of bridge dynamic responses using network-based real-time kinematic GNSS technique. *J. Surv. Eng.* 2016, 142, 04015013. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000167

Сведения об авторах:

Т.Б. Нурпейсова – кандидат технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: t.nurpeissova@satbayev.university).

Г.С. Мадимарова – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: g.madimarova@satbayev.university).

А.Е. Ормамбекова – PhD, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: a.ormambekova@satbayev.university).

Е.Ж. Ормамбеков – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: ye.ormambekov@satbayev.university).

Information about the authors:

T.B. Nurpeissova – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy (<https://orcid.org/0000-0001-8162-6053>), Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev (Almaty, Kazakhstan, e-mail: t.nurpeissova@satbayev.university).

G.S. Madimarova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy (<https://orcid.org/0000-0002-9155-6332>), Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev (Almaty, Kazakhstan, e-mail: g.madimarova@satbayev.university).

A.E. Ormambekova – PhD, Associate Professor of the Department of Surveying and Geodesy, (<https://orcid.org/0000-0003-2735-0257>) Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.ormambekova@satbayev.university).

Y.ZH. Ormambekov – Master of Technical Sciences, senior lecturer at the Department of Mine Surveying and Geodesy, (<https://orcid.org/0009-0001-2248-7214>) Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayeva, Republic of Kazakhstan, e-mail: ye.ormambekov@satbayev.university).

Авторлар туралы мәлімет:

Т.Б. Нурпеисова – Техника ғылымдарының кандидаты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының профессоры, (<https://orcid.org/0000-0001-8162-6053>), Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 050013 (Алматы, Қазақстан, e-mail: t.nurpeissova@satbayev.university).

Г.С. Мадимарова – техника ғылымдарының кандидаты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (<https://orcid.org/0000-0002-9155-6332>), Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 050013 (Алматы, Қазақстан, e-mail: g.madimarova@satbayev.university).

А.Е. Ормамбекова – PhD докторы, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, (<https://orcid.org/0000-0003-2735-0257>) Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 050013 (Алматы, Қазақстан, e-mail: a.ormambekova@satbayev.university).

Е.Ж. Ормамбеков – техника ғылымдарының магистрі, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының аға оқытушысы, (<https://orcid.org/0009-0001-2248-7214>) Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 050013 (Алматы, Қазақстан, e-mail: ye.ormambekov@satbayev.university).

Поступила: 15 февраля 2026 года

Принята: 16 марта 2026 года