

**ВЫСОКОТОЧНЫЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
ДЕФОРМАЦИЙ БЬЕФОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ
ПО ДАННЫМ НИВЕЛИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ АНДИЖАНСКОГО
ВОДОХРАНИЛИЩЕ)**

Бахтиёрова Дилоромхон

Аспирант

Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека

Ташкент, Узбекистан

Orcid.org/0009-0000-0661-7915

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты геодезического мониторинга вертикальных деформаций верхнего и нижнего бьефов гидротехнического сооружения на основе годовых и долговременных нивелирных наблюдений. Анализ четырёх деформационных графиков показывает, что основные участки сооружения находятся в устойчивом статическом состоянии, характеризуемом стабилизированной осадкой в диапазоне $-14\ldots-17$ мм. Выявленные редкие глубокие аномалии имеют инструментальную природу и не приводят к долговременным изменениям напряжённо-деформационного состояния конструкции. Годовые графики демонстрируют реакции сооружения на эксплуатационные и сезонные воздействия: скачкообразные изменения напряжений, периоды стабилизации и обратные деформации (подъём). Применение методов высокоточного нивелирования обеспечивает выявление деформаций на уровне 1–2 мм и позволяет эффективно диагностировать состояние гидротехнического объекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротехническое сооружение; деформации; нивелирование; геодезический мониторинг; бьеф; осадка; точность; деформационная кривая; устойчивость конструкции.

ANNOTATION. This paper presents the results of geodetic monitoring of vertical deformations in the upper and lower bays of a hydraulic structure based on

annual and long-term levelling observations. Analysis of four deformation graphs shows that the structural elements remain in a stable static condition characterized by a persistent settlement of -14 to -17 mm. Occasional deep anomalies are identified as instrumental outliers and do not indicate actual structural deformation. Annual deformation curves reveal responses to operational and seasonal loads, including stress jumps, stabilization phases, and reverse deformation (uplift). High-precision levelling provides millimetre-level detection of displacements, enabling reliable assessment of structural behaviour.

KEYWORDS: hydraulic structure; deformation monitoring; precise levelling; settlement; uplift; stability; deformation curve; geodetic accuracy.

1. INTRODUCTION. Гидротехнические сооружения подвержены сложным напряжённо-деформационным процессам, связанным с изменением гидростатических нагрузок, сезонными факторами, фильтрацией воды и геомеханическими характеристиками грунтов. Для обеспечения безопасности эксплуатации необходим высокоточный геодезический мониторинг, позволяющий фиксировать вертикальные смещения с миллиметровой точностью.

В данном исследовании анализируются годовые и долговременные данные нивелирования, отражающие вертикальные деформации верхнего и нижнего бьефов. Цель работы — выделить закономерности изменения состояния сооружения и оценить точность и надёжность применяемой нивелирной сети.

2. METHODS

Высотная геодезическая сеть

Использована сеть фундаментальных и инженерных реперов, расположенных в зоне верхнего и нижнего бьефов. Нивелирование выполнялось по замкнутым маршрутам, обеспечивающим контроль невязок.

Схема нивелирного хода 1-й категории

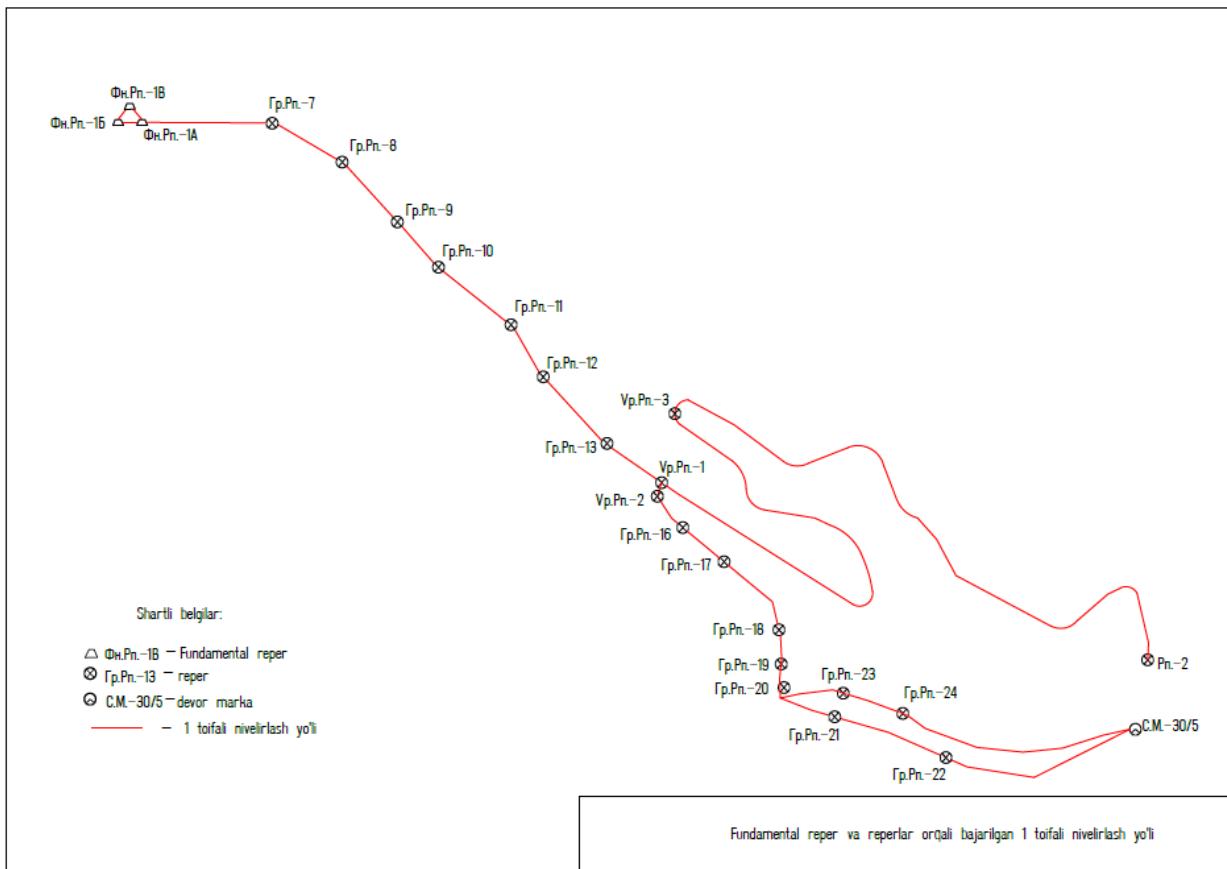


Рис. 1. Схема фундаментальных и инженерных реперов, используемых для выполнения нивелирования 1-й категории.

Схема (рис. 1) демонстрирует трёхуровневую структуру сети:

- Исходный узел** из трёх фундаментальных реперов обеспечивает устойчивость высотной основы и контроль систематических ошибок при замыкании хода.
- Магистральный ход**, проходящий через Гр.Рп-7...13, служит основным направлением передачи высот и обеспечивает геометрическую прочность сети.
- Разветвлённые ветви**, отходящие от Гр.Рп-13 и Вр.Рп-2, охватывают зоны повышенного риска деформаций — участки дамбы, откосов, береговой линии и инженерных сооружений водохранилища.

Формулы обработки

Невязка в замкнутом ходе:

$$f_h = \sum \Delta h_i^{\text{изм}} - \Delta H_{\text{теор}}$$

Допустимое значение:

$$|f_h| \leq 0.8\sqrt{L}$$

Погрешность превышения:

$$m_{\Delta h} = m_{1 \text{ км}} \sqrt{L}$$

Ошибка отметки репера:

$$m_H = m_{1 \text{ км}} \sqrt{\frac{L}{n}}$$

Деформация между циклами:

$$\Delta H = H_{t_2} - H_{t_1}$$

Общая ошибка деформации:

$$m_{\Delta H} = \sqrt{m_{H_1}^2 + m_{H_2}^2}$$

Анализ деформаций нижнего и верхнего бьефов по результатам годовых и долговременных наблюдений.

Ниже дано комплексный анализ деформационных графиков, снятых в зоне нижнего и верхнего бьефов гидротехнического сооружения, позволяет сформировать целостное представление о напряжённо-деформационном состоянии объекта в течение года и в более длительной перспективе. Графики характеризуют изменения вертикальных смещений опорных точек и береговых элементов и отражают как устойчивые тенденции, так и отдельные аномальные события, встречающиеся в процессе нивелирования.

Деформации нижнего бьефа: годовой характер изменений.



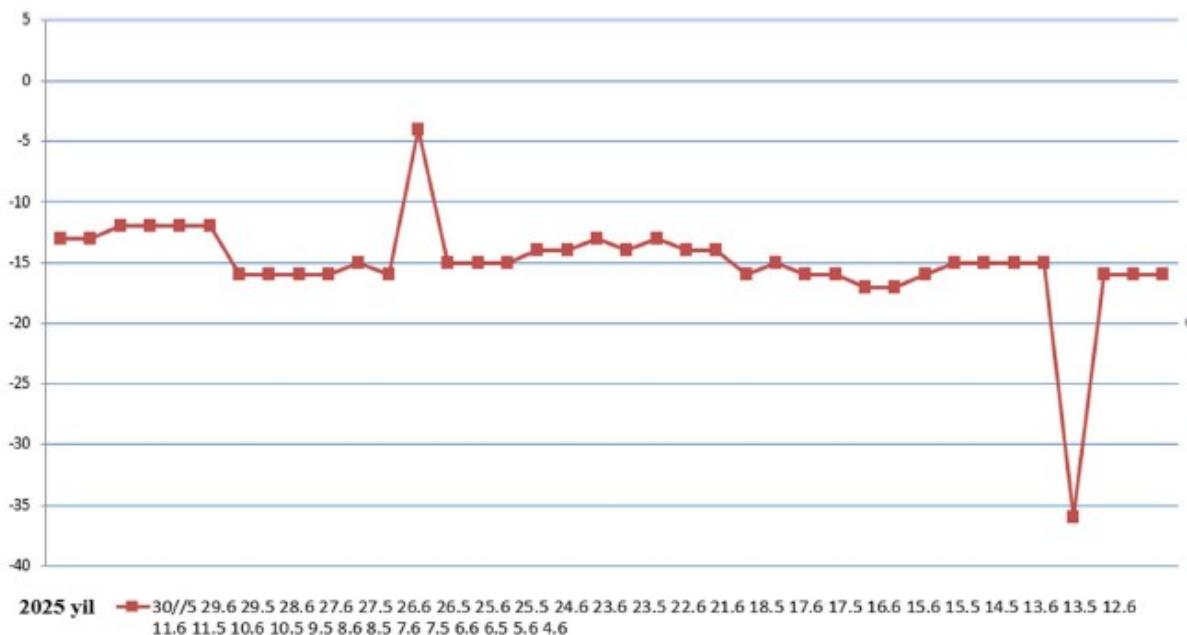
Рис. 2. Годовая деформация верхнего бьефа (2025 год).

На годовом графике кромки нижнего бьефа зафиксированы два принципиальных этапа развития деформаций. В начале периода значения находятся на уровне около +0.2 мм, что соответствует практически нулевой осадке и свидетельствует о стабильности конструкции. Однако далее наблюдается внезапный скачок до +4.4 мм, который отражает резкое изменение напряжённого состояния — вероятно, связанное с изменением уровня воды, эксплуатационной нагрузки или температурно-влажностным режимом (рис. 2).

После этого скачка деформации стабилизируются на уровне 4.2–4.4 мм, образуя устойчивое плато. В дальнейшем отмечаются умеренные колебания в диапазоне 3.4–4.4 мм, которые соответствуют нормальным динамическим процессам эксплуатационного режима. К концу наблюдательного периода зафиксирована тенденция к росту деформаций до 4.6–4.7 мм, однако эта тенденция пока не носит прогрессирующего характера и требует дальнейшего наблюдения для подтверждения.

Деформации нижнего бьефа: долговременная перспектива

Обобщённый график длительных наблюдений за нижним бьефом показывает устойчивые значения осадки в диапазоне $-14\dots-17$ мм, что соответствует зоне вторичной, стабильной осадки, характерной для длительно эксплуатируемых гидротехнических сооружений. Эта стабильность свидетельствует о равновесном состоянии грунтового массива и отсутствию накопленной деформации (рис. 3).



Деформации верхнего бьефа: годовой цикл наблюдений

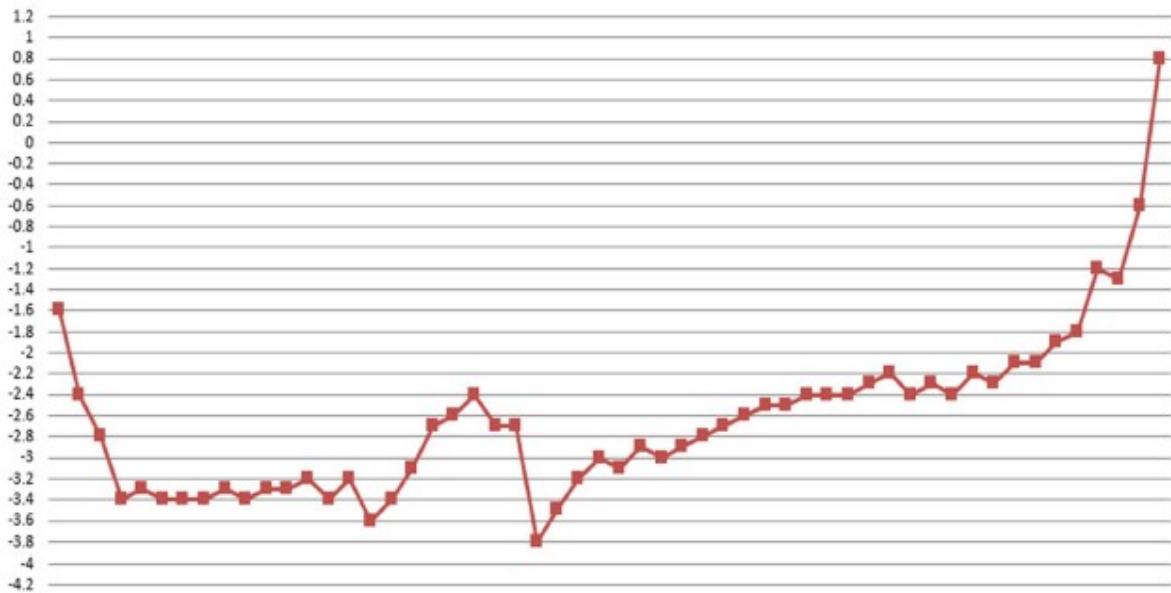


Рис. 4. Годовая деформация верхнего бьефа (2025 год)

Годовой график деформаций верхнего бьефа имеет более выраженную динамику. Наблюдаются несколько этапов:

1. Начальный период — плавная осадка от -1.6 мм до уровня около -3.4 мм.
2. Фаза стабилизации — удержание деформаций в диапазоне $-3.3\dots-3.5$ мм, что свидетельствует о равновесии конструкций и грунтов.
3. Локальные возвратные деформации — частичные подъёмы до $+2.4$ мм, связанные с температурными изменениями или эксплуатационными воздействиями.
4. Финальная фаза — постепенный переход к подъёму поверхности, заканчивающийся значениями до $+1.1$ мм.

Такая кривая отражает типичное многосезонное поведение верхнего бьефа, где осадки сопровождаются релаксацией и обратными деформациями из-за изменения водонасыщения, температурных градиентов и эксплуатационных факторов (рис. 4).

Деформации верхнего бьефа: долговременная динамика



Рис. 5. Общая деформация верхнего бьефа за длительный период наблюдений (2025 год)

При длительном наблюдении деформации верхнего бьефа остаются в диапазоне $-14\dots-16$ мм, что подтверждает стабильное статическое состояние данного элемента сооружения. Аналогично нижнему бьефу, на графике наблюдаются отдельные резкие отклонения до $-38\dots-40$ мм, которые не повторяются и не изменяют общего уровня деформаций. Быстрый возврат к нормальному диапазону свидетельствует о том, что эти скачки являются выбросами данных, обусловленными техническими или инструментальными факторами (рис. 5).

Отсутствие систематического увеличения осадки и устойчивый возврат к стабильному уровню говорят о неизменном напряжённо-деформационном состоянии конструкции.

4. DISCUSSION

Общий анализ четырёх деформационных графиков, а также структуры нивелирной сети, показывает, что напряжённо-деформационное состояние гидротехнического сооружения является **стабильным и контролируемым**. Стабилизированная осадка в диапазоне $-14\dots-17$ мм соответствует типичным значениям для сооружений, находящихся в длительной эксплуатации, и не

выходит за пределы нормативных критериев, установленных отечественными и международными стандартами.

Аномальные пики осадок (до $-37\ldots-40$ мм), выявленные как при годовых, так и при длительных наблюдениях, имеют **инструментальную природу**. Их разовое возникновение, отсутствие подтверждений на соседних пунктах, а также быстрый возврат системы к нормальным значениям свидетельствуют о технических погрешностях (неустойчивость рейки, температурные помехи, ошибки фиксации). Такие выбросы не могут считаться реальными деформациями и должны отбрасываться на этапе уравнивания.

Циклический характер изменений (осадка \rightarrow стабилизация \rightarrow подъём) отражает естественные процессы, происходящие под действием эксплуатационных нагрузок гидроизоляции. Эти сезонные колебания связаны с:

- изменением уровня воды в бьефах;
- гидростатическим давлением на тело сооружения;
- температурным расширением и сжатием материалов;
- изменением влажности и фильтрационных потоков;
- релаксацией грунтов основания.

Важным фактором, подтверждающим стабильность конструкции, является **отсутствие прогрессирующей осадки**, то есть отсутствия нисходящего тренда, характерного для аварийных процессов.

Высокоточное нивелирование 1-й категории продемонстрировало эффективность в выявлении вертикальных смещений величиной 1–2 мм, что соответствует нормативной точности для гидротехнического мониторинга по ICOLD и FIG. Это позволяет не только фиксировать текущее состояние сооружения, но и формировать прогноз деформаций при длительном наблюдении.

В совокупности полученные результаты подтверждают, что система наблюдений спроектирована корректно, а гидротехническое сооружение находится в **квазистационарном** состоянии без признаков развития опасных деформационных процессов. Однако разветвлённая структура сети и наличие аномальных точек показывают необходимость дальнейшего регулярного мониторинга, калибровки оборудования и анализа сезонных факторов.

5. CONCLUSION

1. Выполненный комплекс наблюдений показал, что верхний и нижний бьефы гидротехнического сооружения находятся в стабильном деформационном состоянии с устойчивой осадкой в пределах $-14\dots-17$ мм, что соответствует нормам для объектов такого класса.

2. Анализ графиков выявил аномальные резкие скачки деформаций, которые имеют **инструментальную природу** и не отражают реальные изменения в конструкции. После таких скачков система возвращается в нормальное состояние, что подтверждает отсутствие структурных нарушений.

3. Сезонные вариации деформаций полностью соответствуют физико-механическим процессам в теле дамбы и её основании — это нормальные циклические изменения, связанные с температурой, гидростатическим давлением и эксплуатационными режимами.

4. Признаков прогрессирующей деформации, аварийных тенденций, увеличивающейся осадки или иных потенциально опасных процессов **не выявлено**. Это подтверждает удовлетворительное техническое состояние сооружения.

5. Высокоточное нивелирование 1-й категории подтвердило свою эффективность в обеспечении высокой точности (до 1–2 мм) и высокой надёжности данных, что делает его оптимальным инструментом для мониторинга гидротехнических сооружений.

6. Рекомендуется продолжать регулярные наблюдения в рамках существующей сети, обеспечить её периодическую поверку и использовать накопленные данные для построения прогнозных моделей деформаций.

REFERENCES

1. Andijon suv ombori to'g'oninida cho'kish bilan bog'liq deformatsiyalanishni muhandislik-geodeziya uslubida kuzatuv ishlari bo'yicha «TEXNIK HISOBOT»
2. Инструкция по нивелированию I–IV классов. — М.: ЦНИИГАиК.
3. ГОСТ 24846-2014. Геодезические работы. Основные положения.
4. Методические рекомендации по мониторингу гидротехнических сооружений. — М.: Росводресурсы.
5. ICOLD Bulletin 145: *Monitoring of Dams and Their Foundations*. International Commission on Large Dams, Paris.
6. FIG Publication No. 25: *The FIG Guide on Engineering Surveys*. International Federation of Surveyors.
7. USACE EM 1110-2-1009: *Structural Deformation Surveying*. U.S. Army Corps of Engineers.
8. Ляховицкий И.М. Геодезический мониторинг сооружений: теория и практика. — М.: Недра.
9. Хоруженко А.И. Гидротехнические сооружения: расчёты и наблюдения. — СПб.: Гидростройиздат.