

На правах рукописи

Устинов Александр Валерьевич



Разработка методики геодезического мониторинга гидротехнических
сооружений в процессе компенсационного нагнетания
(на примере здания Загорской ГАЭС-2)

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Косарев Николай Сергеевич.

Официальные оппоненты:

Никитин Андрей Вячеславович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог»;

Сердаков Леонид Евгеньевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера» Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник сектора 1–31.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (Санкт-Петербург).

Защита состоится 20 декабря 2022 г. в 15-00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/ustinov-aleksandr-valerevich/>

Автореферат разослан 1 ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 13.10.2022

Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ 162.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 21.06.1997 № 117 «О безопасности гидротехнических сооружений», а также принятым РАО ЕЭС нормативно-техническим документом «Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» требуется обеспечение необходимого уровня безопасности железобетонных сооружений на стадиях строительства и эксплуатации. В процессе эксплуатации гидротехнические сооружения (ГТС) подвергаются воздействию природной среды и техногенных нагрузок. В результате указанных воздействий происходит изменение свойств материалов конструкций, напряженно-деформируемого состояния (НДС) объекта, его устойчивости, положения и геометрических параметров сооружений. Изменения состояния ГТС являются причиной развития деформационными процессами, которые могут приводить к непроектным смещениям.

В настоящее время выравнивание гидротехнических сооружений, подвергшихся неравномерным осадкам, все чаще выполняется методом управляемого компенсационного нагнетания. При компенсационном нагнетании важно обеспечить высокую точность и оперативность получаемых результатов мониторинга пространственного положения сооружения для эффективного управления процессом нагнетания.

С другой стороны, актуальность темы исследования подтверждается и тем, что обработка ГНСС-измерений в автоматизированных системах геодезического мониторинга (АСГМ), как правило, выполняется относительным методом, когда определяются координаты положения станций мониторинга относительно считающихся стабильными опорных пунктов. Очевидно, что для данного метода критичным является именно предположение о стабильности опорных пунктов АСГМ, что на практике может быть трудно достижимым, поэтому в рамках исследований доказана и практически обоснована возможность применения метода точного точечного позиционирования Precise Point Positioning (PPP) в задаче мониторинга гидро-

технических сооружений для контроля положения опорных пунктов и станций автоматизированных тахеометров.

Таким образом, одной из важных научно-практических задач является разработка методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания.

Степень разработанности темы диссертационной работы определяется исследованием научных публикаций и трудов в области прикладной геодезии применительно к задачам геодезического мониторинга и наблюдения за деформациями инженерных сооружений. Авторами трудов, играющих важную роль, являются следующие известные отечественные и зарубежные ученые: Брынь М. Я., Васютинский И. Ю., Гуляев Ю. П., Жуков Б. Н., Зайцев А. К., Карпик А. П., Ключин Е. Б., Лебедев Н. Н., Левчук Г. П., Никитин А. В., Новак В. Е., Пискунов М. Е., Рязанцев В. Е., Уставич Г. А., Хорошилов В. С., Шоломицкий А. А., Щербаков В. В., Ямбаев Х. К., Borgmann H., Czaja J., Janusz W., Marcello C., Milev G., Santerre R. и др.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания на примере здания Загорской ГАЭС-2.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *основные задачи*:

а) выполнить анализ существующих методов геодезического мониторинга гидротехнических сооружений;

б) выполнить исследования по применению метода Precise Point Positioning для геодезического мониторинга гидротехнических сооружений;

в) разработать методику геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания на примере здания Загорской ГАЭС-2;

г) выполнить апробацию разработанной методики геодезического мониторинга на примере здания Загорской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания;

д) выработать рекомендации по дальнейшему применению разработанной методики геодезического мониторинга для использования ее на аналогичных гидротехнических сооружениях.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются гидротехнические сооружения. Предметом исследования является методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

а) разработана методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания с учетом подъема части здания ГАЭС на величины около полутора метров, что не имеет аналогов как в отечественном, так и в зарубежном гидротехническом строительстве;

б) теоретически обоснована и практически показана возможность применения метода Precise Point Positioning (PPP) для контроля положения опорных пунктов и станций тахеометров в автоматизированной системе геодезического мониторинга гидротехнических сооружений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость исследований заключается в научно-методическом обосновании оптимального состава применяемой контрольно-измерительной аппаратуры, программного обеспечения и методик обработки результатов измерений для подъема части здания ГАЭС на величины около полутора метров.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений позволяет повысить точность и надежность результатов наблюдений за пространственным положением здания станционного узла Загорской ГАЭС в рамках ликвидации последствий осадки и восстановительных работ.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались теория математической обработки геодезических изме-

рений, системный подход, методы математического анализа. Разработанная методика основана на теоретических, аналитических и экспериментальных исследованиях, а также апробирована на реальном уникальном объекте критической инфраструктуры.

Положения, выносимые на защиту:

а) разработанная методика геодезического мониторинга в процессе компенсационного нагнетания повышает точность и надежность результатов контроля пространственного положения гидротехнических сооружений за счет комплексного применения автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры;

б) метод Precise Point Positioning (PPP) позволяет выполнять контроль пространственного положения опорных пунктов и станций тахеометров в автоматизированной системе геодезического мониторинга с требуемой для этого точностью.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные положения диссертации соответствуют областям исследования: 8 – Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, зданий и сооружений, вызванного природными и техногенными факторами, с целью контроля их устойчивости, снижения риска и последствий природных и техногенных катастроф, в том числе землетрясений, 11 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным паспорта специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения и результаты исследования докладывались и получили одобрение на следующих Международных конгрессах и конференциях:

а) на 26 Ассамблее Международного сообщества Геодезии и Геофизики IUGG-2015 (г. Прага, Чехия, 2015);

б) на научно-технических конференциях «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2016, 2017);

в) на VI Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем» (г. Казань, 2017);

г) на XXV Международном Симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Новосибирск, 2019).

Результаты диссертационного исследования внедрены в производственный процесс АО «Институт Гидропроект» в рамках выполнения работ по восстановлению Загорской ГАЭС-2, а также в учебный процесс Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис».

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты исследований отражены в 10 научных статьях, 9 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 156 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 96 наименований, содержит 22 таблицы, 75 рисунков, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности и апробации результатов исследований.

В первом разделе проанализированы методы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений, которые применяются в настоящее время. Соче-

тание методов и состав комплексной системы геодезического мониторинга подбираются для каждого конкретного объекта в зависимости от специфики сооружений и целей мониторинга, требуемой периодичности и точности.

Рассмотрены примеры реализованных проектов автоматизированного геодезического мониторинга ГТС в России и за рубежом. Выполнен обзор систем спутникового мониторинга, состава их оборудования и используемых методик наблюдений.

Во втором разделе приведены общие сведения о сооружениях Загорской ГАЭС-2, а также о произошедшем техническом инциденте. Описаны проектные решения АО «Институт Гидропроект» по ликвидации последствий осадки здания стационарного узла Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания. Показана существующая система геодезического мониторинга сооружений Загорской ГАЭС-2, даны сведения об опорных плановой и высотной сетях гидроузла. Обоснована необходимость разработки методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания в связи с имеющейся реальной производственной задачей подъема здания стационарного узла Загорской ГАЭС-2.

17 сентября 2013 г. вследствие образования эрозионного канала под фундаментной плитой здания Загорской ГАЭС-2 в районе гидроагрегата № 10 произошло затопление верховой части котлована до отметки 1,0 м, соответствующей уровню воды в нижнем бассейне ГАЭС в это время. Помимо затопления верховой части котлована ГАЭС-2, 18 сентября 2013 г. была обнаружена существенная деформация положения здания станции (рисунок 1).

Восстановление Загорской ГАЭС-2 состоит из двух этапов: этап стабилизации и этап восстановления сооружений стационарного узла.

На этапе стабилизации выполнялся анализ вертикальных перемещений здания стационарного узла Загорской ГАЭС-2. Для этой цели проводились наблюдения за осадками сооружения по программе нивелирования II класса. На рисунке 2 показаны результаты наблюдений за осадками по маркам, уста-

новленным со стороны нижнего бьефа на отметке 166,40 м, в период с 09.2013 по 09.2015 на этапе стабилизации.

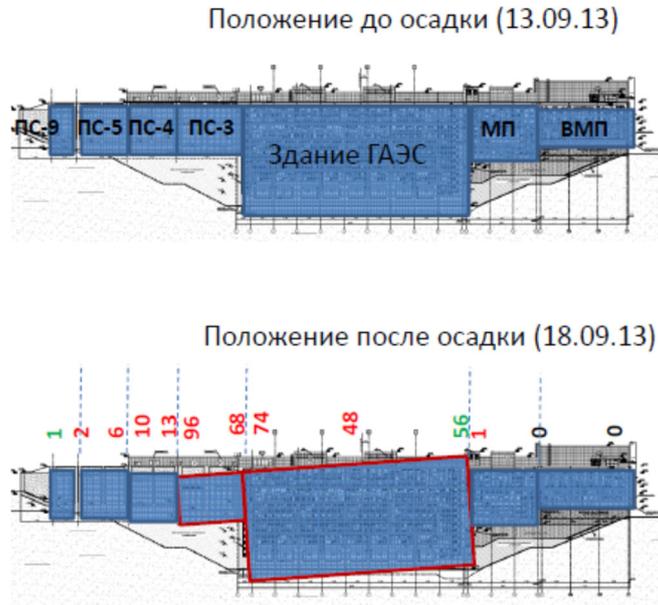


Рисунок 1 – Деформации здания станции Загорской ГАЭС-2 (размеры представлены в сантиметрах)

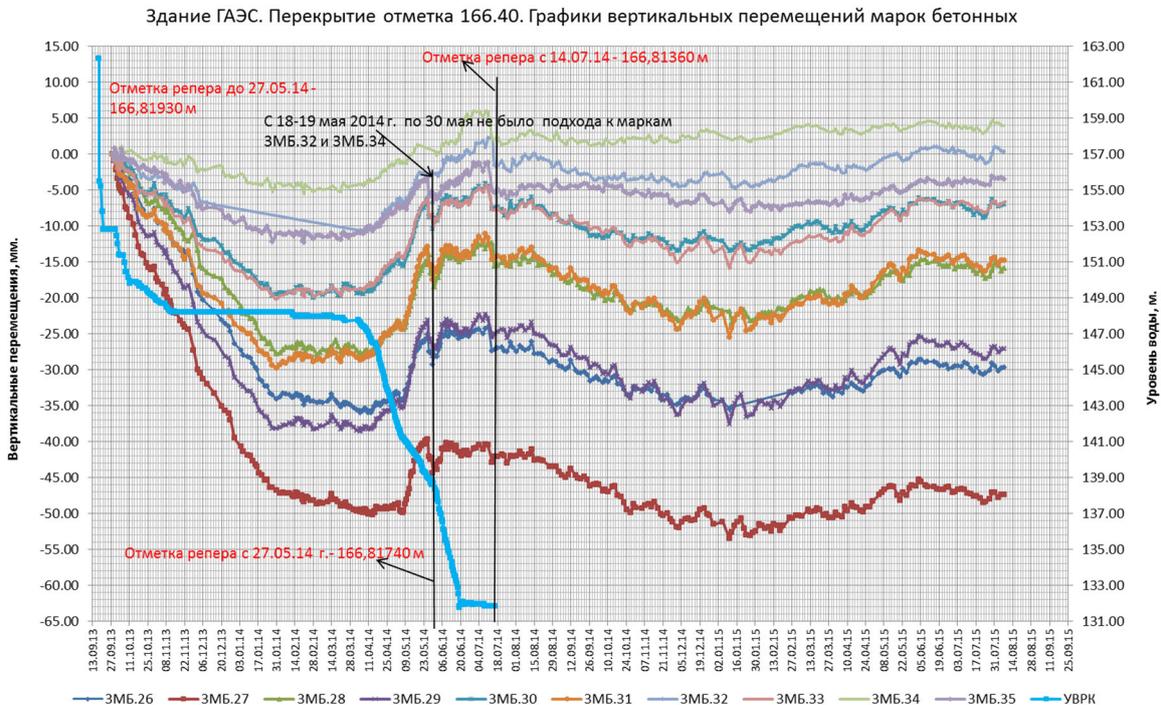


Рисунок 2 – Результаты осадок здания ГАЭС по маркам, расположенным на отм. 166,40

Оценка стабилизации здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 проводилась по наблюдениям за осадками сооружения с применением критерия Фишера для проверки значимости регрессионной модели. В качестве регрессионной модели использовалась квадратичная функция, которая вычислялась на основе метода МНК-оптимизации

$$y = a \cdot t^2 + b \cdot t + c, \quad (1)$$

где t – дата наблюдений.

С помощью критерия Фишера проверяется «нулевая гипотеза», показывающая отсутствие осадки сооружения. «Нулевая гипотеза» отвергается, если

$$F > F_{\text{табл}}, \quad (2)$$

в противном случае «нулевая гипотеза» принимается. Критерий Фишера определяется из следующего выражения:

$$F = \frac{\sigma_{\text{факт}}^2}{\sigma_{\text{ост}}^2}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{факт}}$ – факторная дисперсия;

$\sigma_{\text{ост}}$ – остаточная дисперсия.

Факторная и остаточная дисперсии могут быть вычислены как:

$$\sigma_{\text{факт}}^2 = \frac{\sum (y_t - \bar{y})^2}{k - 1}, \quad \sigma_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y_i - y_t)^2}{n - k}, \quad (4)$$

где y_t – значение уравнения регрессии на дату наблюдения;

\bar{y} – среднее значение осадки;

y_i – величина осадки на дату наблюдения;

$k - 1$ – число степеней свободы для факторной дисперсии;

$n - k$ – число степеней свободы для остаточной дисперсии;

k – количество параметров в уравнении регрессии;

n – объем выборки.

Для ряда наблюдений за осадками по характерной марке ЗМБ.26 были приняты следующие величины: $k = 3$, $n = 38$. С учётом этого критерий Фишера, вычисленный по формуле (3), равен 2,2. Сравнивая вычисленный критерий Фишера с табличным значением ($F_{\text{табл}} = 3,3$), можно сделать вывод о том, что «нулевая гипотеза» принимается, то есть осадка марки ЗМБ.26 не зависит от времени, а уравнение регрессии признается статистически незначимым. Отсюда следует вывод, что осадка здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 полностью стабилизировалась.

На этапе восстановления существующего здания станционного узла Загорской ГАЭС-2, согласно проектной документации, запланированы работы по выравниванию здания ГАЭС с подъемом правобережной части здания на величины около 1,5 м. Осуществление подобного подъема не имеет аналогов как в отечественном, так и в зарубежном гидротехническом строительстве.

Выравнивание здания предусматривается производить за счет управляемого нагнетания в основание сооружения специальных составов. Это нагнетание позволяет увеличить объем грунта под основанием, следовательно, увеличить напряжения в нем. При достижении суммарных напряжений больших, чем суммарное давление сооружения на основании, происходит подъем сооружения. Такой метод в гидротехническом строительстве называется методом компенсационного нагнетания.

В третьем разделе приведены общие сведения о Precise Point Positioning (PPP), проведен анализ применения метода PPP для деформационного мониторинга инженерных сооружений, а также выполнено исследование применимости метода PPP на основе данных ГНСС-приемников, установленных на станциях тахеометров и опорных пунктах АСГМ.

Данные с восьми станций АСГМ Загорской ГАЭС-2, собранные за период с 23 февраля 2022 г. по 23 апреля 2022 г., были обработаны методом PPP с помощью приложения TropicGNSS. В обработке использованы двухчастотные, двухсистемные ГНСС-измерения. Угол отсечки по возвышению устанавливался в 7 градусов. Дискретность измерений составляла 30 секунд.

В качестве исходных данных о точных эфемеридах и поправках часов навигационных спутников использовались продукты, публикуемые GFZ, а также параметры калибровок антенн навигационных спутников и ГНСС-приёмников.

Данные с каждой станции обрабатывались суточными пакетами, в результате чего оценивались среднесуточные значения геоцентрических координат станций. Для достижения максимальной стабильности оцениваемых координат станций в методе PPP учитывались приливные эффекты, а также атмосферные нагрузки, которые были смоделированы с использованием сервиса NASA International Mass Loading Service.

Для удобства интерпретации результатов, вариации среднесуточных координат станций были представлены в виде топоцентрических смещений относительно положения в первый день обработки. По результатам исследований установлено, что точность определения пространственного положения методом точного точечного позиционирования с учетом атмосферных нагрузок составляет 2 мм в плане и 5 мм по высоте.

В четвертом разделе разработана методика геодезического мониторинга пространственного положения гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания, основанная на применении автоматизированных тахеометров, ГНСС-приемников, а также датчиков гидростатического нивелирования. Проведена апробация методики автоматизированного мониторинга при подъеме здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания.

Разработанная автором методика включает в себя непрерывный контроль положения гидротехнического сооружения, в результате которого сравниваются пространственные координаты, определенные автоматизированной системой геодезического мониторинга, с координатами, заданными расчетной моделью подъема сооружения. Исходя из результатов данного сравнения, даются рекомендации по оперативной корректировке процесса инъектирования.

Реализация предлагаемой методики осуществляется в следующей последовательности.

1 Изучение и анализ технического задания, проектных чертежей на исследуемое сооружение, а также исполнительной документации.

2 Определение требования к точности и оперативности геодезического мониторинга, исходя из параметров конструкций сооружения, их состояния, полученных деформаций, величин отклонений от проектного положения сооружения, характера и скорости ожидаемых перемещений в процессе компенсационного нагнетания.

3 Разработка структуры, схемы и состав аппаратно-программного комплекса (АПК) системы мониторинга, а также определение периодичности измерений.

4 Предварительный расчет точности результатов мониторинга в соответствии с разработанной схемой.

5 Проведение измерений автоматизированными датчиками (автоматизированные тахеометры, датчики гидростатического нивелирования и др.).

6 Контроль пространственного положения опорных пунктов и станций тахеометра с помощью ГНСС приемников в режиме Precise Point Positioning.

7 Совместный анализ данных автоматизированных тахеометров и гидростатического нивелирования с оценкой точности результатов мониторинга с учетом смещений опорных пунктов и станций тахеометров (осуществляется в автоматизированном режиме в специализированном программном обеспечении).

8 Контроль полученных результатов определения высотного положения конструкций ГТС в процессе компенсационного нагнетания методом геометрического нивелирования II класса.

9 Постадийное сравнение расчетных показаний при подъеме с результатами геодезического мониторинга и, при необходимости, выполнение корректировки процедуры подъема.

Блок-схема предлагаемой методики геодезического мониторинга представлена на рисунке 3.

Одним из важных элементов разработанной методики является контроль пространственного положения опорных пунктов и станций автоматизированных тахеометров системы мониторинга методом PPP, в результате которого выполняются отслеживание и оперативный учет долгопериодических движений опорных пунктов и станций тахеометров, что в свою очередь позволяет повысить точность и надежность результатов геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания.

Разработанная методика геодезического мониторинга была апробирована при подъеме здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания в период с 03.07.2021 г. по 02.06.2022 г. По предварительным расчётам, на основе которых была составлена модель подъема здания, на каждом этапе инъекции необходимо контролировать подъем на величину, равную 50 мм.

Для оперативного контроля и выявления величины подъёма здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания была определена структура, схема и состав аппаратно-программного комплекса системы мониторинга и периодичность инструментальных наблюдений. В таблице 1 приведен состав контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) автоматизированной системы мониторинга, а в таблице 2 – периодичность проведения инструментальных наблюдений.

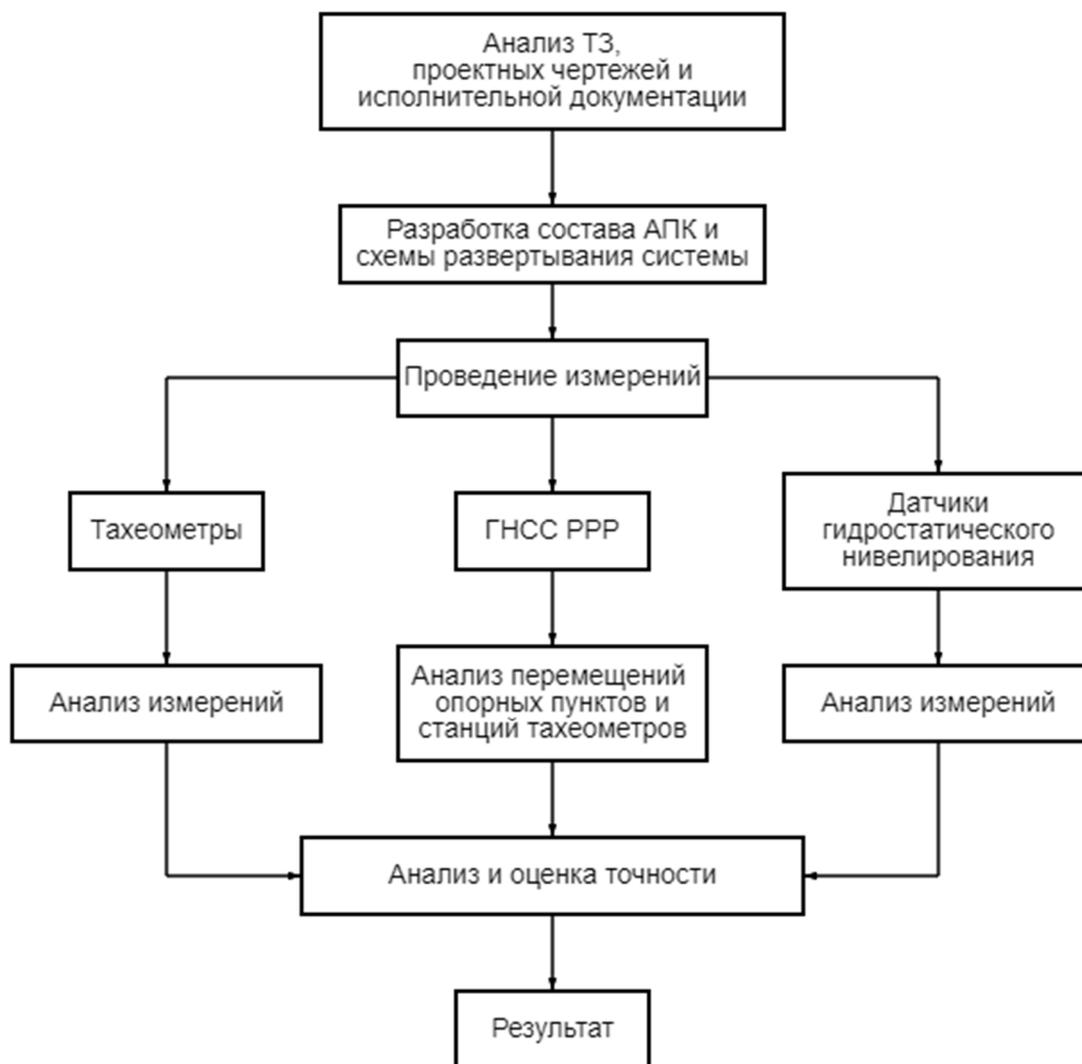


Рисунок 3 – Блок-схема методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания

В соответствии со схемой проведения измерений, контроль стабильности опорных пунктов АСГМ Загорской ГАЭС-2 проводится по результатам нивелирования II класса с периодичностью два раза в год. Для оперативного учета движений опорных пунктов в АСГМ проводятся измерения с помощью ГНСС-приемников в режиме «статика». Контроль положения автоматизированных тахеометров, которые расположены в зоне деформаций, выполняется методом обратной засечки по результатам линейно-угловых измерений на опорные отражатели. Для повышения точности и надежности результатов мониторинга за счет отслеживания и учета медленных перемещений опорных пунктов и станций тахеометров АСГМ пространственного положения здания Загорской ГАЭС-2 применяется метод РРР.

Таблица 1 – Состав контрольно-измерительной аппаратуры автоматизированной системы мониторинга пространственного положения здания Загорской ГАЭС-2

| Наименование КИА | Тип, марка | Количество КИА | Примечание |
|--|------------------|----------------|--|
| 1 Автоматизированный тахеометр | Leica TM50I 0,5" | 4 | Устанавливаются на базовых станциях линейно-угловых измерений |
| | Итого: | 4 | |
| 2 ГНСС-приемник | Leica GR30 | 4 | Устанавливаются на базовых станциях линейно-угловых измерений |
| | | 5 | Устанавливаются на базовых станциях спутниковых измерений |
| | Итого: | 9 | |
| 3 ГНСС-антенна | Leica AR25 | 4 | Устанавливаются на базовых станциях линейно-угловых измерений |
| | Leica AR10 | 5 | Устанавливаются на базовых станциях спутниковых измерений |
| | Итого: | 9 | |
| 4 Отражатель | Leica GRZ122 | 9 | Устанавливается на базовых станциях |
| | Leica GRZ122 | 89 | Устанавливается на мониторинговых знаках |
| | Итого: | 98 | |
| 5 Датчик гидростатического нивелирования | GEOKON 4675 | 20 | Устанавливаются в галерее на отм. 125,10, а также в отсасывающей трубе каждого агрегата на отм. 125,10 |
| | Итого: | 20 | |
| 6 Метеостанция | Vaisala 534 WXT | 4 | Устанавливаются на базовых станциях линейно-угловых измерений |
| | | 1 | Устанавливается на здании ГАЭС |
| | Leica PAA-33X | 5 | Устанавливаются на базовых станциях спутниковых измерений |
| | Итого: | 10 | |
| Общее количество КИА: | | 150 | |

Таблица 2 – Периодичность проведения инструментальных наблюдений за пространственным положением здания Загорской ГАЭС-2

| Контролируемые параметры | Методы наблюдений | Периодичность фиксации контролируемых параметров |
|---|---|---|
| Координаты и высоты опорных пунктов | Спутниковые геодезические измерения в режиме реального времени, постобработки и в режиме PPP | Каждый час в автоматическом режиме* Каждые 4 часа в ручном (аварийном) режиме** PPP раз в сутки, статический режим с постобработкой при необходимости |
| Пространственные перемещения станций автоматизированных тахеометров | Линейно-угловые измерения опорных марок, контроль станций автоматизированных тахеометров с помощью спутниковых приемников в режиме реального времени, постобработки и PPP | Каждые 2 часа в автоматическом режиме* Каждые 4 часа в ручном (аварийном) режиме** PPP раз в сутки, статический режим с постобработкой при необходимости |
| Пространственные перемещения зданий и сооружений | Геодезические методы (фиксация перемещений марок) с применением автоматизированных тахеометров | Каждый час в автоматическом режиме* Каждые 4 часа в ручном (аварийном) режиме** |
| Пространственные перемещения планово-высотных знаков на склонах | Геодезические методы (фиксация перемещений марок) с применением автоматизированных тахеометров | Каждый час в автоматическом режиме* Каждые 4 часа в ручном (аварийном) режиме** |
| Пространственные перемещения основания здания ГАЭС (отм.125,10 м) | Измерения при помощи датчиков гидростатического нивелирования | Каждый час в автоматическом режиме* Каждые 4 часа в ручном (аварийном) режиме** |
| Метеоданные | Температура и атмосферное давление с помощью метеодатчиков и метеостанций | Каждый час в автоматическом режиме* Каждые 4 часа в ручном (аварийном) режиме** |
| <p>Примечания:</p> <p>* При условии работы автоматизированной системы геодезического мониторинга.</p> <p>** В случае выхода из строя автоматизированной системы геодезического мониторинга.</p> | | |

Пространственное положение плиты перекрытия здания Загорской ГАЭС-2 в АГСМ контролируется с помощью автоматизированных тахеометров по маркам, установленным на отметке 166,40 м. На отметке 125,10 м в галерее, помещении насосных и в отсасывающих трубах установлены датчики гидростатического нивелирования, которые показывают вертикальные перемещения подземной части здания.

По результатам предварительного расчета в программном комплексе МГСети точность определения высотного положения в реализованной АСГМ характеризуется величиной, равной 0,2 мм, а плановой – 0,1 мм.

При расчёте точности линейно-угловых измерений были приняты следующие параметры:

- СКО измерения горизонтального и вертикального углов – 0,5";
- СКО измерения длины 0,6 мм +1 мм/км.

На рисунке 4 показана схема линейно-угловых измерений, реализованная в автоматизированной системе геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2.

Схема аппаратно-программного комплекса автоматизированной системы геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2 приведена на рисунке 5.

Аппаратно-программный комплекс работает следующим образом. Данные с автоматизированных тахеометров, метеостанций и датчиков гидростатического нивелирования поступают в программное обеспечение (ПО) Leica GeoMoS. Измерения с ГНСС-приемников в режиме «статика» обрабатываются в программное обеспечение Leica GNSS Spider и затем передаются в ПО Leica GeoMoS для дальнейшего учета и анализа.

В качестве программного продукта для вычисления координат и высот опорных пунктов и станций тахеометров по методу PPP используется программа TroproGNSS. Полученные результаты анализа положения опорных пунктов и станций тахеометров поступают затем в ПО Leica GeoMoS для учета и дальнейшего анализа.

Далее по результатам совместной обработки комплекса измерений оценивается пространственное положение отражателей и датчиков гидростатического нивелирования, установленных на конструкциях здания Загорской ГАЭС-2. Полученные из результатов оценки пространственные перемещения точек конструкций передаются в программное обеспечение Sodis Building M, где осуществляется визуализация результатов с настройкой графического отображения, преобразование в удобный для интеграции с информационно-диагностической системой гидроузла формат, а также необходимый для диспетчера на АРМ формат и вид (числовой и графический).

Затем полученные в результате мониторинга пространственные координаты сравниваются с координатами, заданными расчетной моделью подъема здания Загорской ГАЭС-2. Исходя из результатов данного сравнения, даются рекомендации по оперативной корректировке процесса инъецирования.

По данным наблюдений автоматизированных тахеометров за 11 месяцев с 03.07.2021 по 02.06.2022 наибольшие величины вертикальных перемещений наблюдаются на марках МТ41 и МТ62, на дату 02.06.2022 г. подъем МТ41 составил 90 мм, а МТ62 – 91 мм.

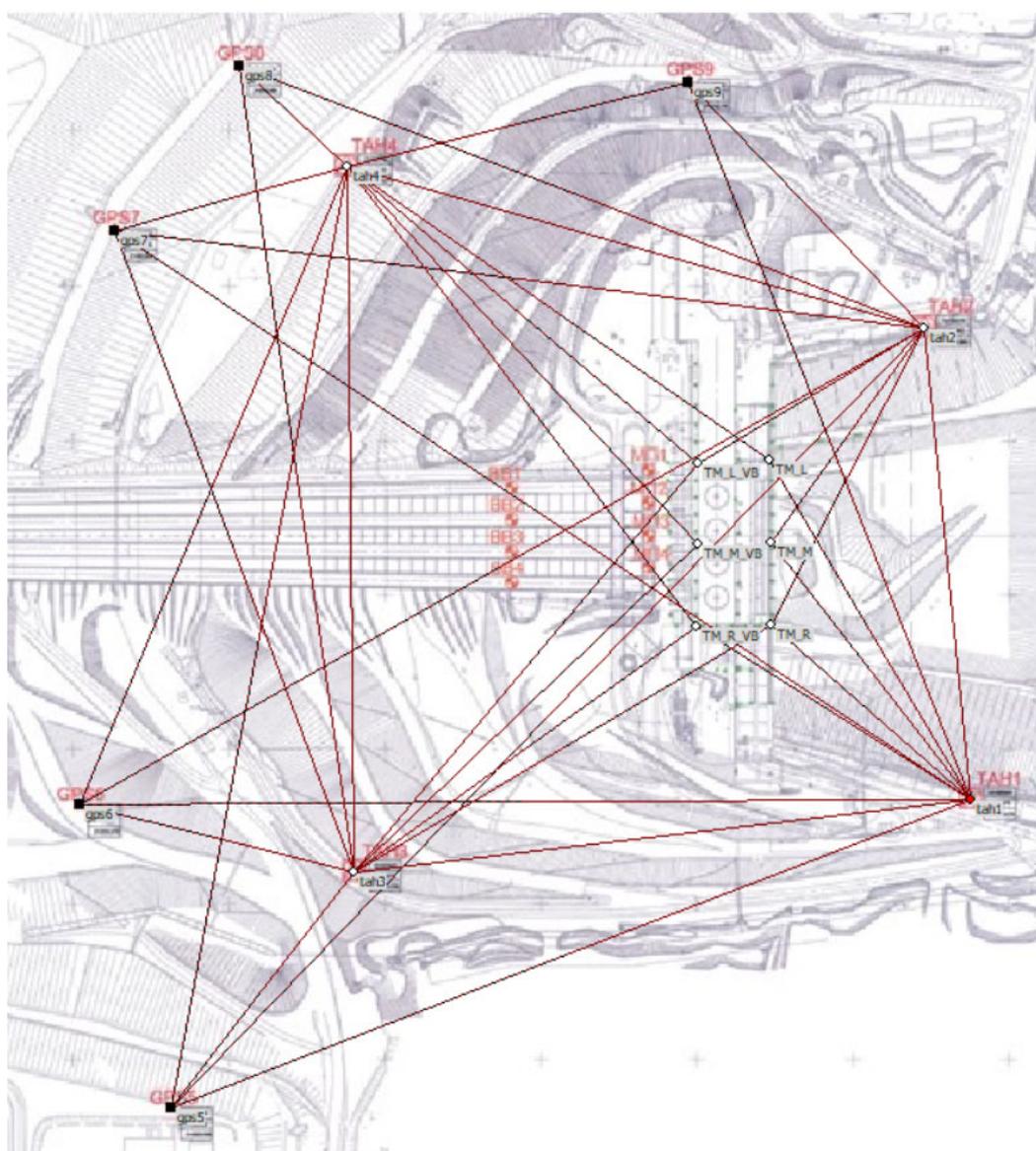


Рисунок 4 – Схема линейно-угловых измерений, реализованная в автоматизированной системе геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2

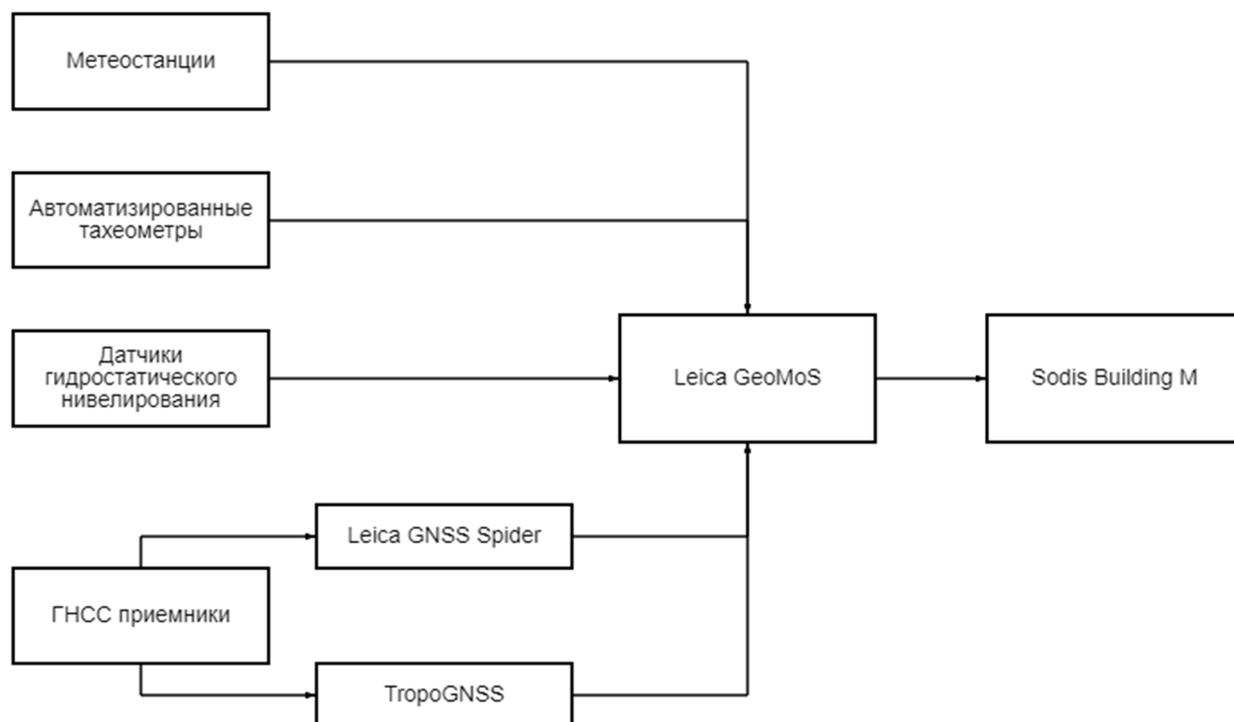


Рисунок 5 – Схема аппаратно-программного комплекса автоматизированной системы геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2

По данным системы гидростатического нивелирования за период с 20.04.2022 по 02.06.2022, перемещение датчика DGN10 относительно базового DGN1 составило 7 мм. По данным же автоматизированных тахеометров подъем ближайшей к указанному датчику марки МТЗ, расположенной на углу здания ГАЭС на отметке 166,40 м, составил 11 мм. Разница суммарных перемещений составила 4 мм.

Дополнительно контроль результатов мониторинга автоматизированными тахеометрами проводился по бетонным маркам с периодичностью один цикл в месяц методом геометрического нивелирования II класса. Разность суммарных перемещений марок нивелирования и марок АСГМ не превышает 3 мм. Исходя из этого, можно сделать следующий вывод: предложенная методика позволяет выполнять мониторинг высотного положения здания стационарного узла Загорской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания с требуемой для этого точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований поставленная цель достигнута, а именно, разработана методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания на примере здания Загорской ГАЭС-2.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ существующих методов геодезического мониторинга гидротехнических сооружений, который показал, что в настоящее время в России в АСГМ не используется метод точного точечного позиционирования (PPP) как для определения смещений элементов конструкций гидротехнических сооружений, так и для контроля положения опорных пунктов, входящих в систему автоматизированного мониторинга;

– выполнено исследование по применению метода точного точечного позиционирования для геодезического мониторинга гидротехнических сооружений, которое показало применимость данного метода для мониторинга смещений опорных пунктов и станций тахеометров, входящих в автоматизированную систему геодезического мониторинга;

– разработана методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания, которая позволяет повысить точность и надежность результатов контроля пространственного положения гидротехнических сооружений за счет комплексного применения автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры, входящей в автоматизированную систему геодезического мониторинга;

– выполнена апробация разработанной методики геодезического мониторинга на примере здания Загорской ГАЭС-2, которая подтвердила возможность применения разработанной методики для контроля пространственного положения конструкций здания станционного узла с требуемой для этого точностью;

– выработаны рекомендации по дальнейшему применению разработанной методики геодезического мониторинга, согласно которым она может быть использована для контроля пространственного положения аналогичных гидротехнических сооружений с целью обеспечения оперативности получения результатов мониторинга, повышения надежности и безопасности проведения геодезических работ в процессе компенсационного нагнетания.

Перспектива дальнейших исследований заключается в развитии методов геодезического мониторинга гидротехнических сооружений с использованием новых средств измерений, например наземных лазерных сканеров и интерферометрических радаров, а также более широкого применения метода точного точечного позиционирования (PPP) в геодезическом мониторинге.

Разработанная в диссертационной работе методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений рекомендуется к использованию при контроле пространственного положения гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания для обеспечения оперативности получения результатов мониторинга, повышения надежности и безопасности проведения геодезических работ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Кафтан, В. И. Применение глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений / В. И. Кафтан, А. В. Устинов. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 12. – С. 11–19.

2 Устинов, А. В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений / А. В. Устинов. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 6. – С. 39–43.

3 Калинин, В. В. Влияние неоднородностей поля водяного пара в приземном слое атмосферы в районе водохранилищ на результаты спутникового мониторинга гидротехнических сооружений / В. В. Калинин, А. В. Устинов, Р. В. Загретдинов. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 3. – С. 19–25.

4 Устинов А. В. Результаты мониторинга вертикальных перемещений в процессе компенсационного нагнетания на опытном участке Загорской ГАЭС-2 / А. В. Устинов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 128-142. – Текст : непосредственный.

5 Методика метрологической поверки ГНСС-приемников системы мониторинга высоконапорной ГЭС / А. П. Карпик, Н. С. Косарев, К. М. Антонович, А. П. Решетов, А. В. Устинов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. № 4. – С. 34–43.

6 Устинов, А. В. Технология мониторинга перемещений гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания / А. В. Устинов, В. И. Кафтан. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 1. – С. 2–7.

7 Калинин, В. В. Результаты экспериментальных исследований применения технологии PPP для глобальных навигационных спутниковых систем мониторинга Саяно-Шушенской ГЭС / В. В. Калинин, А. В. Устинов, Р. В. Загретдинов. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 2. – С. 2–7.

8 Калинин, В. В. Влияние атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания стационарного узла Загорской ГАЭС-2 методом PPP / В. В. Калинин, А. В. Устинов, Н. С. Косарев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 34–41. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-34-41.

9 Калинин, В. В. Сравнение оценок координат станций сети мониторинга Загорской ГАЭС-2, полученных в результате обработки ГНСС измерений

методом двойных разностей и методом PPP / В. В. Калинин, А. В. Устинов. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 10. – С. 22–25.

10 Устинов, А. В. Технология геодезического мониторинга деформаций гидротехнических сооружений на основе использования глобальных навигационных систем / А. В. Устинов. – Текст : непосредственный // Науки о Земле. – 2015. – № 1 (13). – С. 133–136.