

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент
Косарев Николай Сергеевич

Новосибирск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.....	10
1.1 Общие сведения о гидротехнических сооружениях	10
1.2 Факторы, влияющие на техническое состояние гидротехнических сооружений	15
1.3 Задачи и методы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений	21
1.4 Геодезические средства измерений в системах мониторинга гидротехнических сооружений	26
1.5 Автоматизированные системы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений: состав, структура, специфика их развертывания	39
1.6 Анализ существующих автоматизированных систем геодезического мониторинга на базе ГНСС-технологий в зарубежных странах и в России	44
1.7 Выводы по первому разделу	54
2. ПРЕДПОСЫЛКИ И ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2 МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИОННОГО НАГНЕТЕНИЯ.....	56
2.1 Общие сведения о строящейся Загорской ГАЭС-2	56
2.2 Технический инцидент при строительстве Загорской ГАЭС-2	64
2.2.1 Общие сведения о техническом инциденте. Меры по предотвращению технического инцидента.....	64
2.2.2 Анализ результатов натурных наблюдений за показателями состояния сооружений станционного узла Загорской ГАЭС-2 в период подготовки станции к подъему здания	75

2.3 Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2. Обоснование необходимости разработки методики комплексного мониторинга Загорской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания	81
2.4 Результаты геодезического мониторинга подъема фундаментной плиты на опытном участке в процессе компенсационного нагнетания	86
2.5 Выводы по второму разделу	94
3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ТОЧНОГО ТОЧЕЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.....	95
3.1 Метод точного точечного позиционирования	95
3.2 Анализ применения метода PPP для деформационного мониторинга различных инженерных сооружений.....	99
3.3 Обоснование применения метода точного точечного позиционирования для геодезического мониторинга гидротехнических сооружений	107
3.3.1 Сравнительный анализ точности ГНСС-наблюдений относительным методом и методом PPP в сети геодезического мониторинга гидротехнического сооружения.....	107
3.3.2 Исследование применимости метода PPP для контроля положения опорных пунктов и станций тахеометров автоматизированной системы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений.....	110
3.4 Выводы по третьему разделу	116
4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО НАГНЕТАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2)	117
4.1 Методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания.....	117

4.2 Апробация методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания на Загорской ГАЭС-2.....	119
4.2.1 Структура и состав автоматизированной системы геодезического мониторинга здания Загорской ГАЭС-2	119
4.2.2 Обоснование точности геодезического мониторинга здания Загорской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания	129
4.2.3 Результаты апробации методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания на Загорской ГАЭС-2	133
4.3 Выводы по четвертому разделу	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) АКТ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС АО «ИНСТИТУТ ГИДРОПРОЕКТ».....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС АВТОНОМНОЙ НЕКОММЕРЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УНИВЕРСИТЕТ ИННОПОЛИС».....	156

ВВЕДЕНИЕ

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 гидротехнических 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 измерений, 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 (приложение А), а также в учебный процесс Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис» (приложение Б).

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.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

1.1 Общие сведения о гидротехнических сооружениях

Гидротехническое сооружение (ГТС) представляет собой инженерное сооружение, подвергающееся воздействию водной среды и предназначенное для использования и охраны водных ресурсов, предотвращения вредного воздействия вод, в том числе загрязненных жидкими отходами [50].

Гидротехнические сооружения могут классифицировать по различным признакам. На рисунке 1.1 показан один из вариантов классификации гидротехнических сооружений [39].

Особое место среди ГТС занимают специальные сооружения, к которым относятся, в том числе, ГЭС и ГАЭС.

В соответствии с СП [51] ГТС типа ГЭС и ГАЭС подразделяют:

- на основные;
- второстепенные.

Под основными ГТС типа ГЭС/ГАЭС понимают ГТС, повреждение или разрушение которых приводит к нарушению или прекращению нормальной работы ГЭС/ГАЭС, и второстепенные, разрушение или повреждение которых не влечет за собой серьезных последствий.

По типу слагаемого материала ГТС типа ГЭС/ГАЭС делятся на две большие категории:

- бетонные и железобетонные плотины;
- плотины из грунтовых материалов.

В свою очередь, бетонные и железобетонные плотины делятся на два типа:

- плотины на скальном основании;
- плотины на нескальном основании.

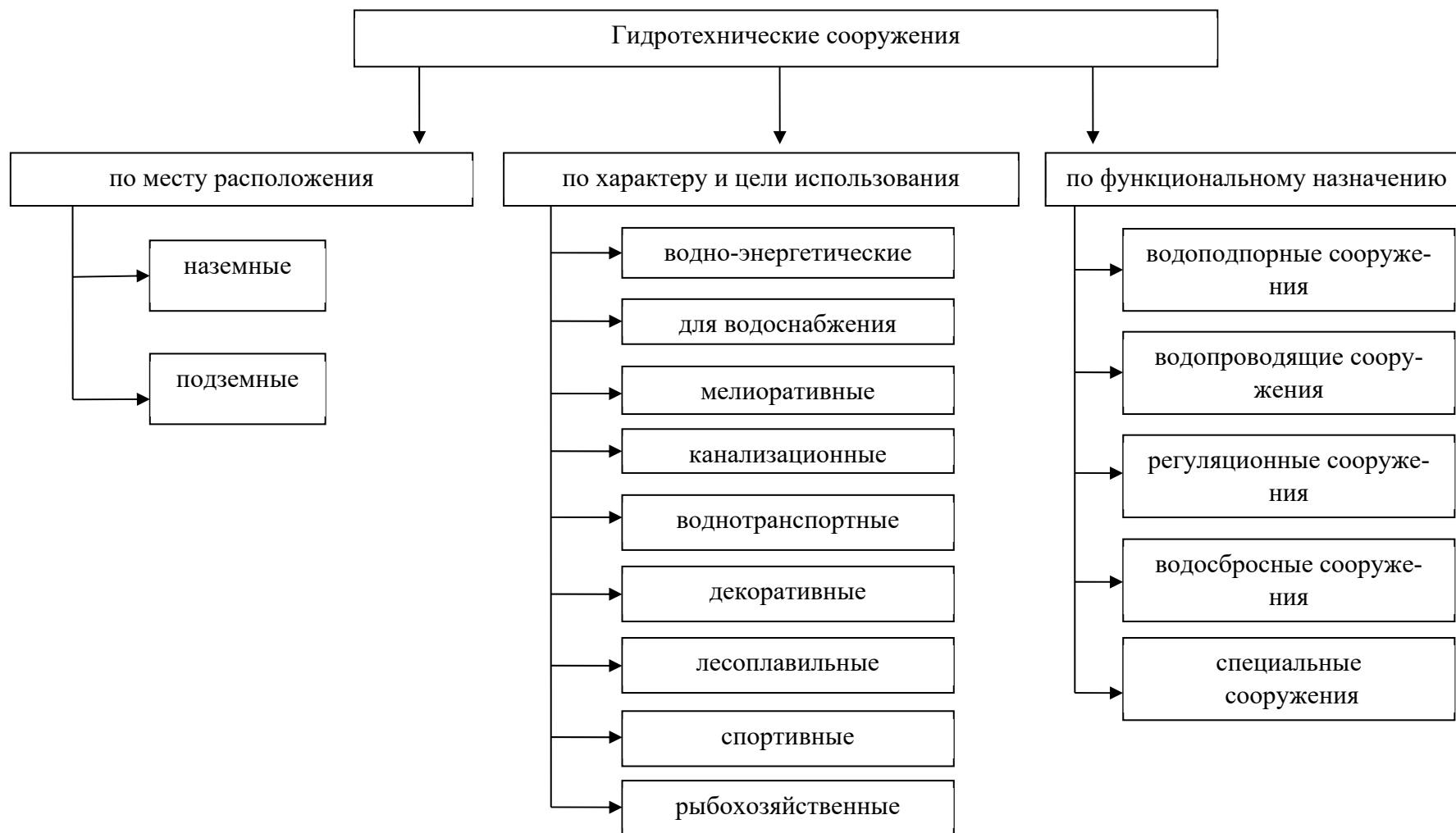


Рисунок 1.1 – Классификация гидротехнических сооружений [39]

В таблице 1.1 приведены типы и виды бетонных плотин на скальном основании.

Таблица 1.1 – Типы и виды бетонных плотин на скальном основании

Типы бетонных плотин	Виды бетонных плотин	Описание бетонных плотин [6]
Гравитационные	массивные	Гравитационные плотины удерживают давление воды (сохраняют устойчивость на сдвиг и опрокидывание) благодаря своему весу. Современные гравитационные плотины имеют форму поперечного сечения близкую к прямоугольному треугольнику с основанием, составляющим 0,7–0,8 ее высоты. Верховая грань плотины почти вертикальная, низовая – наклонная
	с расширенными швами	
	с продольной полосью у основания	
	со ступенчатой низовой гранью	
Контрфорсные	массивно-контрфорсные	Контрфорсные плотины представляют собой наклонные стены, перегораживающие поток, и опирающиеся на контрфорсы – треугольные опоры-стены, расположенные вдоль потока. Устойчивость контрфорсных плотин на сдвиг от действия гидростатического давления верхнего бьефа обеспечивается не только весом самой плотины, но и пригрузкой воды напорной грани плотины
	многоарочные	
	с плоским перекрытием	
Арочные	с защемленными пятами	Арочные плотины представляют собой арки (своды), положенные «на бок». Устойчивость арочных плотин, в основном, обеспечивается передачей распора (нормальной силы в арочных поясах) на берега. В узких ущельях арочные плотины представляют собой тонкостенные конструкции. В широких ущельях поперечное сечение арочной плотины может быть достаточно массивным, сходным с сечением гравитационной плотины с уклоном низовой грани 0,3–0,6, такие плотины принято называть арочно-гравитационными
	с периметральным швом	
	из трехшарнирных поясов	
	с гравитационными устоями	

Бетонные и железобетонные плотины на не скальных основаниях проектируют, как правило, в качестве водосбросных.

В таблице 1.2 приведены виды водосбросных бетонных плотин на не скальном основании.

Плотины из грунтовых материалов в зависимости от материала их тел и противофильтрационных устройств, а также способов возведения, подразделяют на следующие типы [50]:

- земляная насыпная;
- земляная намывная;
- каменно-земляная;
- каменно-набросная.

Таблица 1.2 – Виды водосбросных бетонных плотин на скальном основании

Виды водосбросных бетонных плотин на скальном основании	Описание плотин [9]
Водосливная	Плотины на скальном основании имеют, как правило, развитый в горизонтальном направлении подземный контур и обязательно конструкции в нижнем бьефе, предназначенные для гашения избыточной кинетической энергии воды (сбрасываемой в НБ) и защищающие русло от опасных для устойчивости сооружений размывов. Конструкция водосливной плотины предусматривает перелив воды через ее гребень при пропуске излишних расходов воды. Перелив потока может осуществляться как по всей длине гребня, так и через отдельные водосливные отверстия, ограниченные по бокам быками (а для крайних пролетов – устоями). В быках и устоях, как правило, делают пазы или опорные конструкции для затворов, с помощью которых регулируется расход выпускаемой из верхнего бьефа воды
С глубинными водосбросами	В некоторых случаях используют плотины только с донными водосбросными отверстиями. Это возможно, если емкость водохранилища большая, как на Рыбинском гидроузле, и имеется время для осуществления ремонтных работ в случае появления трудностей при подъеме затвора, да и количество отверстий достаточно большое
Двухъярусная	В определенных условиях находят применение двухъярусные плотины, которые отличаются лучшей маневренностью затворами при пропуске паводков и, что особенно важно, возможностью промыва наносов, отложившихся перед плотиной. Такие плотины позволяют пропускать строительные расходы без устройства временных отверстий, осложняющих производство работ

В таблице 1.3 приведены типы и отличительные признаки плотин из грунтовых материалов [50].

Согласно [37] ГТС делятся на классы опасности в зависимости:

- от высоты гидротехнических сооружений;
- типа грунта их оснований;

- назначения и условий эксплуатации;
- максимального напора на водоподпорные сооружения;
- последствий возможных аварий.

Таблица 1.3 – Типы и отличительные признаки плотин из грунтовых материалов

Типы плотин из грунтовых материалов	Отличительные признаки
Земляная насыпная	Грунты от глинистых до гравийно-галечниковых; отсыпают насухо с уплотнением или в воду
Земляная намывная	Грунты от глинистых до песчано-гравийных и гравийно-галечниковых; намывают средствами гидромеханизации
Каменно-земляная	Грунты тела – крупнообломочные; противофильтрационных устройств – от глинистых до мелкопесчаных
Каменно-набросная	Грунты тела – крупнообломочные; противофильтрационные устройства из негрунтовых материалов или комбинированные: грунт + инъекция и т. п.

Всего выделяется четыре класса опасности. В таблице 1.4 приведена классификация ГТС в зависимости от класса опасности [37].

Таблица 1.4 – Классификация ГТС в зависимости от класса опасности

Гидротехническое сооружение	Тип грунта основания	Высота гидротехнического сооружения (м)			
		I класс	II класс	III класс	IV класс
Плотины из грунтовых материалов	A	более 80	от 50 до 80	от 20 до 50	менее 20
	B	более 65	от 35 до 65	от 15 до 35	менее 15
	B	более 50	от 25 до 50	от 15 до 25	менее 15
Плотины бетонные, железобетонные; подводные конструкции зданий гидростанций; судоходные шлюзы; судоподъемники и другие сооружения, участвующие в создании напорного фронта	A	более 100	от 60 до 100	от 25 до 60	менее 25
	B	более 50	от 25 до 50	от 10 до 25	менее 10
	B	более 25	от 20 до 25	от 10 до 20	менее 10
Примечание – Типы грунта основания: A – скальные; B – песчаные, крупнообломочные и глинистые в твердом и полутвердом состоянии; B – глинистые водонасыщенные в пластичном состоянии.					

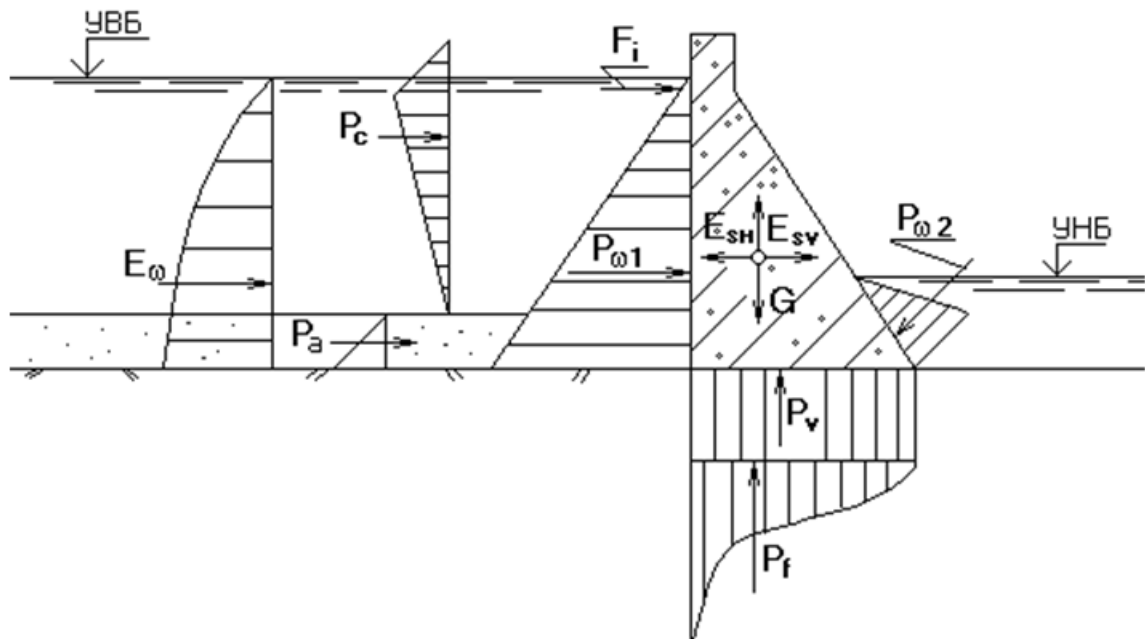
ГТС I и II класса по [12] являются особо опасными и технически сложными объектами, а ГТС высотой более 100 м или с заглублением подземной части более,

чем на 15 м ниже планировочной отметки земли, относятся к уникальным объектам.

1.2 Факторы, влияющие на техническое состояние гидротехнических сооружений

В процессе эксплуатации ГТС подвергаются воздействию природной среды и техногенных нагрузок. В результате указанных воздействий происходит изменение свойств материалов конструкций, напряженно-деформируемого состояния объекта, его устойчивости, положения и геометрических параметров сооружений. Изменения состояния ГТС являются причиной развития деформационными процессами, которые могут приводить к непроектным смещениям.

В процессе эксплуатации ГТС на него оказывают воздействия внешние и внутренние силы, которые показаны на рисунке 1.2.



G – собственный вес плотины; $P_{\omega 1}$ и $P_{\omega 2}$ – гидростатическое давление со стороны верхнего и нижнего бьефов соответственно; P_v – взвешивающее давление; P_f – фильтрационное противодавление; P_a – давление наносов; P_c – давление волн; F_i – давление льда; E_{ω} – сейсмическое воздействие воды; E_{sh} и E_{sv} – горизонтальное и вертикальное сейсмические воздействия на плотину

Рисунок 1.2 – Схема нагрузок и воздействий, влияющих на плотину [13]

Нагрузки и воздействия, оказывающие влияние на ГТС, могут быть классифицированы по типу. В соответствии с этой классификацией они подразделяются на постоянные, временные и особые. Временные, в свою очередь, делятся на два вида: нагрузки длительного действия и кратковременные нагрузки.

К постоянным относят следующие типы нагрузок и воздействий:

– *собственный вес сооружения*, который рассчитывается по формуле

$$G = \rho_{\text{пл}} \cdot V \cdot g, \quad (1.1)$$

где $\rho_{\text{пл}}$ – плотность материала тела плотины;

V – объем тела плотины;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

– *вес постоянного оборудования*, местоположение которого не меняется в процессе эксплуатации сооружения (затворы, подъемные механизмы и т. п.);

– *вес воды над плотинной или ее элементами*, работающими совместно с сооружением;

– *гидростатическое давление воды на верховую и низовую грани плотины*, которое рассчитывается по формуле

$$P_{\omega} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot y, \quad (1.2)$$

где y – глубина погружения расчетной точки;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды;

– *взвешивающее давление воды* определяется формулой

$$P_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot y', \quad (1.3)$$

где y' – глубина погружения точки под уровнем нижнего бьефа;

– *фильтрационное противодействие* (P_f);

- вес грунта над сооружением;
- боковое давление грунта со стороны верхнего и нижнего бьефов.

К временным нагрузкам длительного действия относят:

- давление наносов перед плотиной в случае песчаных грунтов, которое рассчитывается по формуле

$$P_a = \rho_n \cdot g \cdot y_n \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varnothing_n}{2} \right), \quad (1.4)$$

где y_n – толщина слоя наносов;

$\varnothing_n$ – угол внутреннего трения;

ρ_n – плотность наносов, определяется формулой

$$\rho_n = (\rho_{nc} - \rho_v) \cdot (1 - n), \quad (1.5)$$

где ρ_{nc} – плотность скелета грунта,

n – пористость наносов.

– температурные воздействия, определяемые для года со средней амплитудой колебаний среднемесячных температур.

Кратковременные нагрузки делятся:

– на силовое динамическое воздействие воды при уровнях в верхнем и нижнем бьефах, соответствующих пропуску через сооружения расходов основного расчетного случая [51]

$$P_{\text{дин}} = \overline{p}_{\text{дин}} + p', \quad (1.6)$$

где $\overline{p}$ – средневзвешенное значение динамического давления;

p' – пульсационная составляющая гидродинамического давления.

Средневзвешенное значение динамического давления определяется по формуле

$$\overline{p}_{\text{дин}} = c_d \cdot p \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (1.7)$$

где c_d – коэффициент давления (определяемый эмпирическим путем).

Пульсационная составляющая гидродинамического давления определяется формулой

$$p' = \delta \cdot p \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (1.8)$$

где δ – коэффициент пульсации.

Динамические нагрузки при осуществлении сбросов воды следует определять для плотин I и II классов по результатам расчетов и экспериментальных исследований, для плотин III и IV классов — по результатам расчетов или аналогам [49];

- давление льда при его среднемноголетней толщине;
- волновое воздействие;
- нагрузки от подъемных, перегрузочных, транспортных и других конструкций и механизмов, которые перемещаются по сооружению;
- нагрузки от судов.

К особым относят следующие нагрузки:

- силовое действие воды при ФПУ ВБ и УНБ, соответствующих пропуску воды через сооружение расхода поверочного расчетного случая и нормальной работе дренажных устройств;
- силовое действие воды при НПУ ВБ и УНБ, соответствующее минимальному по технологическим и экологическим требованиям расходу при нарушении одного из дренажных или противифльтрационных устройств;

– температурные воздействия для года с максимальной амплитудой колебаний среднемесячных температур и для года с максимально низкой среднемесячной температурой;

– давление льда при максимальной многолетней толщине льда обеспеченностью 1 %;

– волновое воздействие при максимальной многолетней скорости ветра обеспеченностью 2 % для I и II классов сооружений и 4 % – для сооружений III и IV классов;

– сейсмическое воздействие учитывается в сейсмических районах [47].

Перечисленные нагрузки и воздействия учитываются в расчете конструкций ГТС при проектировании и влияют на определение допустимых смещений и деформаций.

Величины допустимых смещений и деформаций ГТС для каждого объекта устанавливаются в «Декларации безопасности» ГТС объекта энергетики, где, в том числе указываются уровни технического состояния, диагностические показатели и их критериальные значения [36].

В результате оценки состояния ГТС определяются уровни технического состояния и безопасности ГТС [53]:

I – технически исправное состояние (нормальный уровень безопасности) – состояние сооружения, соответствующее всем требованиям нормативных документов и проекта;

II – работоспособное состояние (пониженный уровень безопасности) – категория технического состояния, при которой техническое состояние гидротехнического сооружения удовлетворяет требованиям обеспечения технологических процессов и безопасной эксплуатации, но имеются дефекты и повреждения, а также частичные нарушения правил эксплуатации, которые не могут оказать непосредственного влияния на снижение работоспособности гидротехнического сооружения, его основания и строительных конструкций; при этом значения диагностических показателей состояния сооружения не превышают критериальных значений K1;

III – ограниченно работоспособное состояние (неудовлетворительный уровень безопасности) – категория технического состояния, при которой гидротехническое сооружение и его основание пригодны для дальнейшей эксплуатации при условии введения щадящих режимов работы и разработки мероприятий по устранению выявленных дефектов и повреждений;

IV – неработоспособное (опасное, аварийное) состояние (опасный уровень безопасности) – категория технического состояния, при которой гидротехническое сооружение, его основание, строительные конструкции или оборудование не пригодны для дальнейшей эксплуатации до восстановления, капитального ремонта или реконструкции с ликвидацией всех повреждений и разрушений, которые привели к потере работоспособности.

Границы между техническими состояниями (предельно допустимые значения диагностических показателей для данного технического состояния) задаются критериями безопасности.

Критерии безопасности гидротехнического сооружения – предельные значения количественных и качественных показателей состояния гидротехнического сооружения и условий его эксплуатации, соответствующие допустимому уровню риска аварии сооружения и утвержденные в установленном порядке федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими государственный надзор за безопасностью ГТС (Ростехнадзор).

K1 – первый (предупреждающий) уровень значений диагностических показателей, при достижении которого устойчивость, механическая и фильтрационная прочность ГТС и его основания, а также водосбросные и водопропускные сооружения находятся в работоспособном состоянии; критериальное значение. K1 задает границу между состоянием II (работоспособным) и состоянием III (ограниченно работоспособным).

K2 – второй (предельный) уровень значений диагностических показателей, при превышении которого эксплуатация ГТС в проектных режимах недопустима. Критериальное значение K2 задает границу между состояниями III (ограниченно работоспособным) и IV (неработоспособным).

1.3 Задачи и методы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений

С целью обеспечения безопасности гидротехнических сооружений и прилегающих территорий необходимо проводить мониторинг технического состояния ГТС в процессе эксплуатации для своевременного обнаружения неблагоприятных процессов и принятия необходимых оперативных решений.

Мониторинг технического состояния ГТС состоит в проведении инструментальных и визуальных наблюдений за показателями работы и состояния сооружений, а также за опасными техногенными и природными процессами и их развитием для оценки надежности и безопасности сооружений. При этом контролировать необходимо не только сами ГТС, но и вмещающие их геологические блоки и прилегающие территории, то есть техноприродную систему (ТПС), в которой геологическая среда и гидротехническое сооружение взаимно воздействуют друг на друга.

На гидротехнических сооружениях I и II класса, расположенных в зонах с высокой сейсмической активностью, необходимо организовывать геодинамические полигоны [52], которые позволяют проводить регулярные наблюдения, а также осуществлять контроль изменения геодинамической обстановки, в частности анализировать развитие опасных геодинамических процессов и явлений в ТПС.

Основным звеном мониторинга технического состояния ГТС является система натурных наблюдений, которая в общем случае включает геодезические, гидрологические и гидрогеологические наблюдения, а также наблюдения с использованием закладной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). На рисунке 1.3 показана классификация натурных наблюдений.

Инструментальные наблюдения, входящие в состав натурных наблюдений, осуществляются с помощью стационарной КИА, установленной на сооружениях гидроузла и вблизи них. Визуальные наблюдения проводятся постоянно или систематически путем осмотра всего сооружения, а также его конструктивных элементов для выявления дефектов, оценки состояния ГТС, определения вида и объема работ, необходимого для обеспечения работоспособности ГТС.



Рисунок 1.3 – Классификация натурных наблюдений

Основу инструментальных наблюдений составляют геодезические и геотехнические методы мониторинга (см. рисунок 1.3), которые дополняют друг друга и позволяют обеспечивать качественный мониторинг технического состояния ГТС. Для всестороннего и комплексного анализа состояния ГТС инструментальные и визуальные наблюдения объединяют в автоматизированную систему диагностики и контроля (АСДК). Частным случаем АСДК является автоматизированная система геодезического мониторинга (АСГМ), которая зачастую и разворачивается на гидротехнических сооружениях.

Обычно АСДК состоит из автоматизированной системы опроса (АСО) КИА и информационно-диагностической системы (ИДС). АСО КИА обеспечивает опрос КИА, сбор данных и передачу их в ИДС. Информационно-диагностическая система в свою очередь проводит обработку и анализ данных мониторинга.

АСДК в своей структуре имеет следующие элементы:

- нижний уровень – система сбора, преобразования и передачи данных посредством телекоммуникаций на центральный блок сбора информации автоматизированной системы опроса КИА;
- верхний уровень – программно-аппаратный комплекс, включающий центральный блок сбора данных автоматизированного опроса КИА и информационно-диагностическую систему контроля состояния сооружений с соответствующим техническим и программным обеспечением.

В соответствии Федеральным законом РФ «О безопасности гидротехнических сооружений» № 117-ФЗ от 21.07.97 и СО 153-34.20.501–2003 «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации», ИДС является обязательным элементом системы безопасности при эксплуатации ГТС гидроэлектростанций [35, 48].

К настоящему времени для контроля технического состояния ГТС научными институтами отрасли разработаны несколько ИДС, такие как БИНГ, Дедал и др. [22, 31, 59].

Наибольшее распространение получила ИДС БИНГ, которая эффективно используется на различных ГТС, сейчас поставляется третья версия ИДС, которая получила название БИНГ-3.

ИДС БИНГ-3 обеспечивает [5]:

- настройку и администрирование системы;
- обработку и визуализацию результатов наблюдений (построение графиков, карт с изолиниями, фотографии дефектов и др.);
- ведение базы данных визуальных и инструментальных наблюдений;
- определение количественных и качественных показателей состояния, исходя из результатов измерений датчиков, а также по информации в журналах наблюдений и ведомостях дефектов;
- назначение и адаптацию критериев безопасности ГТС;
- сравнение вычисленных показателей состояния с назначенными критериями безопасности;
- выдачу актуальной информации о состоянии и технических характеристиках КИА, включая диапазон показаний, расположение измерительных устройств на схеме установленной КИА и др.;
- составление технических паспортов сооружений, ввод и хранение справочной (описательной и графической) информации о контролируемых объектах, измерительных устройствах и их характеристиках;
- ведение журналов технического состояния ГТС и оборудования (ведомостей дефектов, отклонений от заданных параметров, описательной информации и фотографий);
- визуализацию и обработку временных рядов показаний измерительных устройств и показателей состояния за любой задаваемый пользователем интервал времени, для этого в системе имеется математический аппарат для аппроксимации, экстраполяции и статистического анализа результатов инструментальных измерений с применением различных аналитических функций и логических процедур;

- ввод, хранение и выдачу паспортных характеристик и справочных данных о конструктивных особенностях и условиях работы сооружения, включая принципиальные конструктивные разрезы и планы, геологические, климатические и гидрологические данные, сведения о действующей системе контроля безопасности;
- отбор и поиск информации по задаваемым признакам, в том числе по чертежам и схемам размещения КИА;
- подготовку и печать отчетной документации;
- возможность контролировать сроки и периодичность проведения визуальных и инструментальных наблюдений, а также технического обслуживания КИА;
- создание и хранение резервных копий системы.

В качестве примера на рисунке 1.4 показан график осадки секции плотины по данным датчиков гидронивелирования в ИДС БИНГ-3.

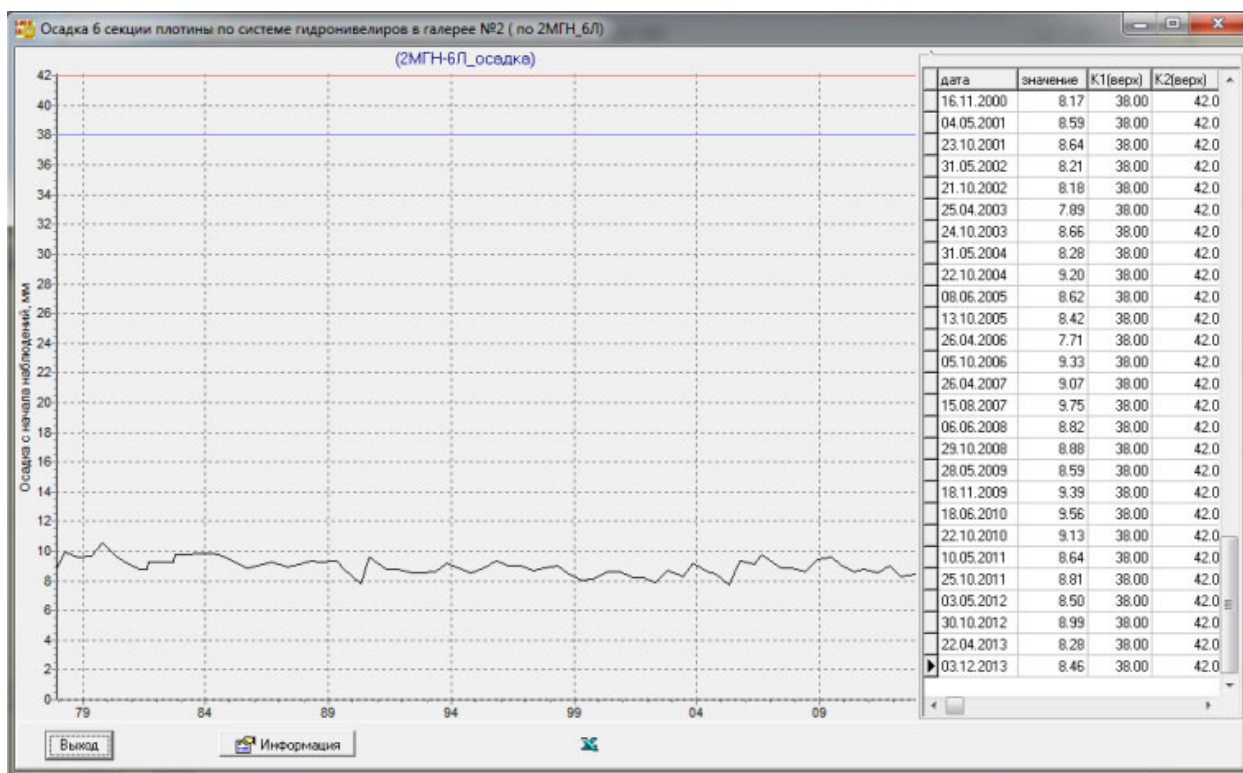


Рисунок 1.4 – Пример графика осадки секции плотины по данным гидронивелиров в ИДС БИНГ-3 [5]

1.4 Геодезические средства измерений в системах мониторинга гидротехнических сооружений

В комплексе наблюдений за состоянием ГТС важная роль отводится геодезическим методам контроля [7, 8, 19, 28, 61]. Геодезические измерения на гидротехнических сооружениях проводятся для контроля плановых и вертикальных перемещений ГТС, а также взаимных перемещений элементов сооружения.

Плановые смещения сооружений определяются с помощью сдвигомеров, приборов створных измерений, прямых и обратных отвесов, электронных тахеометров, ГНСС приемников и другой аппаратуры [46]. Наблюдения за взаимным смещением секций здания ГТС и отдельных элементов сооружений осуществляется с помощью двуосных или трехосных щелемеров, установленных на деформационных швах.

Осадки бетонных сооружений контролируются наблюдениями за высотным положением поверхностных и глубинных марок методом геометрического нивелирования, а также с использованием гидронивелиров.

Отклонения элементов сооружений, например секций здания ГЭС, от вертикального положения определяются с помощью инклинометров. Для контроля подвижек склонов и оползневых процессов на территории гидроузлов используются скважинные инклинометры.

Наблюдения за русловыми деформациями дна проводятся с помощью многолучевых эхолотов, гидролокаторов бокового обзора, интерферометров, а также систем подводного 3D-сканирования.

Прямые и обратные отвесы. Системы прямых и обратных отвесов используются для наблюдений за плановыми перемещениями плотин ГТС. Прямой отвес представляет собой стальную или инварную проволоку (струну), которая устанавливается в вертикальной шахте бетонной плотины. Верхний конец струны закрепляется, а к нижнему концу крепится груз, который помещается в бак с демпфирующей жидкостью (рисунок 1.5).

На разных уровнях плотины в шахте устанавливаются ручные или автоматизированные координатометры, с помощью которых определяются перемещения струны.

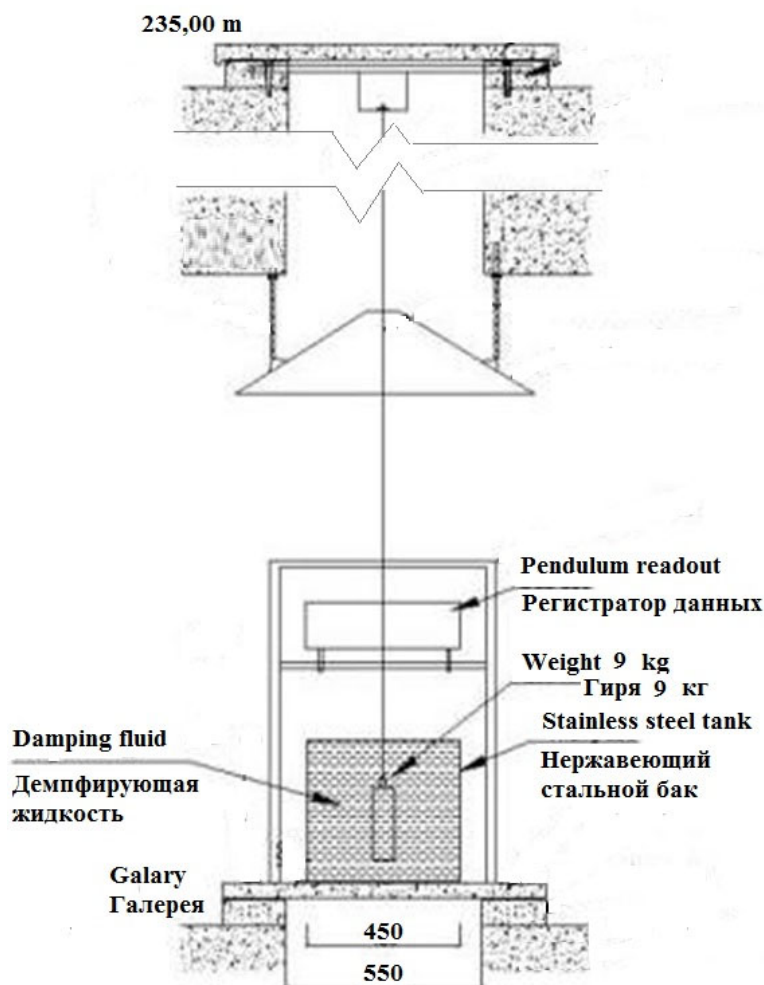


Рисунок 1.5 – Конструкция автоматизированного прямого отвеса

У обратного отвеса, в отличие от прямого, нижний конец струны закрепляется, а верхний со специальным поплавком помещается в емкость с демпфирующей жидкостью.

К основным достоинствам отвесов можно отнести простоту и невысокую стоимость установки. Прямые отвесы конструктивно рекомендуется делать длиной не более 40–50 м, в некоторых случаях не более 15 м [58], ввиду существенного раскачивания проволоки (струны) отвеса. Также к недостаткам отвесов можно отнести необходимость контроля положения якоря путем периодического определения его координат относительно закрепленных на гребне плотины плановых пунктов.

На рисунке 1.6 показан общий вид автоматизированного прямого отвеса, установленного в галерее бетонной плотины гидроузла.



Рисунок 1.6 – Общий вид автоматизированного прямого отвеса в галерее бетонной плотины гидроузла

Точность определения крена прямыми и обратными отвесами зависит в основном от цены деления координатометра или принципа регистрации данных в автоматизированных системах.

Электронные тахеометры. Плано-высотные смещения определяются с помощью электронных тахеометров в автоматизированном режиме. Электронные тахеометры, расположенные на специально оборудованных знаках (рисунок 1.7), производят высокоточные линейно-угловые измерения на отражатели, установленные на конструкциях контролируемого сооружения.

Станция тахеометра может также располагаться в зоне деформаций. Положение самого тахеометра контролируется обратной засечкой на опорные пункты, расположенные на устойчивом основании вне зоны деформаций. Кроме того, в комплексных системах мониторинга на станции тахеометра и на опорных знаках могут устанавливаться антенны ГНСС-приемников для дополнительного контроля перемещения пунктов в системе мониторинга.



Рисунок 1.7 – Электронный тахеометр Leica TM30, установленный на ГТС

Практически на всех крупных ГТС Российской Федерации для мониторинговых целей применяются роботизированные тахеометры фирмы Leica Geosystems [3, 4, 20, 40, 60]. Зачастую в качестве инструмента для выполнения линейно-угловых измерений используется роботизированный тахеометр Leica TM50I (0,5"). Общий вид роботизированного тахеометра представлен на рисунке 1.8, а технические характеристики приведены в таблице 1.5.



Рисунок 1.8 – Общий вид роботизированного тахеометра Leica TM50I (0,5"), применяемого для деформационного мониторинга ГТС

Таблица 1.5 – Технические характеристики тахеометра Leica TM50I (0,5")

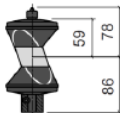
Точность угловых измерений	0,5"
Безотражательные измерения	1 000 м
Безотражательные измерения (точность измерений)	2 мм +2 ppm
Безотражательные измерения (время измерений)	обычно 3 с
Измерения расстояний на отражатель (дальность на отражатель (GPR1))	3 500 м
Измерения расстояний на отражатель (точность измерений)	0,6 mm + 1 ppm
Измерения расстояний на отражатель (время измерений)	обычно 2,4 с
Запись и передача данных (внутренняя память)	1 Гб
Запись и передача данных (запоминающие устройства)	SD-карта 1 Гб
Зрительная труба (увеличение)	30 ^x
Зрительная труба (минимальное фокусное расстояние)	от 1,7 м до бесконечности
Рабочая температура	от –20 до + 50°C
Защита от пыли и влаги	IP65

В качестве отражательных марок для точек мониторинга обычно используются отражатели Leica модель GRZ122. На рисунке 1.9 показан общий вид отражателя, а в таблице 1.6 приведены технические характеристики данного отражателя.



Рисунок 1.9 – Общий вид отражателя Leica GRZ122, используемого в системах геодезического мониторинга ГТС

Таблица 1.6 – Технические характеристики отражателя Leica GRZ122

Наименование	Постоянная призмы, мм	Точность центрирования, мм	Угловое отклонение, "	Дальность ATR, м	Схема
GRZ122	23,1	2	6	600	

ГНСС-приемники в АСГМ могут служить как для контроля конструкций сооружений, так и для мониторинга пространственного положения опорных пунктов планово-высотной сети и станций тахеометров в комплексных системах. Сбор данных с ГНСС-приемников может осуществляться как в режиме реального времени, так и режиме постобработки. В качестве средств спутникового позиционирования в АСГМ зачастую используются ГНСС-приемники типа Leica GR30 с антеннами типа Leica AR25 (Choke Ring) для базовых станций с тахеометрами и с антеннами типа Leica AR10 для базовых спутниковых станций, совмещенных с опорным отражателем [55].

Общий вид ГНСС-антенны AR25 представлен на рисунке 1.10, технические характеристики представлены в таблице 1.7. Общий вид ГНСС-антенны AR10 представлен на рисунке 1.11, технические характеристики представлены в таблице 1.8. Общий вид ГНСС приемника GR30 представлен на рисунке 1.12, технические характеристики представлены в таблице 1.9.



Рисунок 1.10 – Общий вид ГНСС антенны AR25 Choke Ring, устанавливаемой в системах геодезического мониторинга ГТС

Таблица 1.7 – Технические характеристики ГНСС антенны Leica AR25

Тип антенны	Спутниковая геодезическая антенна типа Choke Ring с 3D-кольцами и элементом Dorne-Margolin
Прием сигналов	ГНСС: L1, L2, L5, GLONASS: L1, L2, L3, Galileo: E2-L1-E1, E5a, E5b, E6, AltBOC, Compass: B1, B2, B3, L5, L-Band (вкл. SBAS, OmniSTAR и CDГНСС)
Коэффициент усиление	типовое 40 дБ
Коэффициент шума	0,5–1,2 дБ
Температурный диапазон: Рабочий Хранения	От -55 до +85 °C От -55 до +90 °C
Защита от воздействия внешних факторов	Влажность: до 100 %; Защита от дождя, пыли, песка, ветра: IP67; Водонепроницаемость при кратковременном погружении в воду на глубину до 1 м
Аксессуары	Защитный колпак (обтекатель)



Рисунок 1.11 – Общий вид ГНСС антенны Leica AR10, используемой в системах геодезического мониторинга ГТС

Таблица 1.8 – Технические характеристики ГНСС антенны Leica AR10

Тип антенны	Антенна с большим встроенным отражающим экраном
Защитный колпак	Да
Прием сигналов	GPS: L1, L2 (L2C), L5, GLONASS: L1, L2, L3, Galileo: E1, E5a, E5b, E5a+b (AltBOC), E6, Compass: B1, B2, B3, L-Band: SBAS, OmniSTAR, CDGPS
Коэффициент усиления, номинальный	29 дБ
Коэффициент шума	< 1.8 дБ
Стабильность фазового центра	< 1 мм
Рабочий температурный диапазон	От -40 до +70 ° C
Температурный диапазон хранения	От -55 до +85 ° C
Защита от воздействия внешних факторов	Влажность: до 100 %; Защита от дождя, пыли, песка, ветра: IP67; Водонепроницаемость при кратковременном погружении в воду на глубину до 1 м



Рисунок 1.12 – Общий вид ГНСС приемника Leica GR30, устанавливаемого в системах геодезического мониторинга ГТС

Таблица 1.9 – Технические характеристики ГНСС приемника Leica GR30

ГНСС-технологии	Запатентованная технология Leica SmartTrack+: – точные измерения фазы несущей всех GNSS систем (СКО < 0,5 мм); – отличное отслеживание низколетящих спутников; – минимальное время инициализации; – улучшенное шумоподавление
ГНСС-Сигналы	555 универсальных каналов: – GPS: L1, L2, L2C, L5; – ГЛОНАСС: L1, L2P, L2C; – Galileo: E1, E5a, E5b, AltBOC; – BeiDou: B1, B2, B3; – QZSS: L1, L2C, L5; – SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS
Web и FTP сервисы	Управление и настройка через Web-интерфейс; Защищенный доступ по HTTPS, SSL сертификатам и блокировка портов; FTP сервер и FTP клиент; Отправление сообщений по электронной почте (E-Mail)
Дополнительное ПО	Leica GNSS Spider. Управление одиночными постоянно действующими базовыми станциями и сетями референчных станций.
Запись данных	Съемная карта память SD объемом до 32 Гб. Запись до 12 параллельных файлов измерений. Частота записи до 50 Гц. Поддержка форматов RINEX, Hatanaka и Leica MDB с возможностью Zip архивирования
Передача данных	До 20 параллельных потоков данных. Частота передачи до 50 Гц. Поддержка форматов Leica, Leica4G, CMR, CMR+, RTCM v2.1/2.2/2.3, RTCM v3.0/3.1/3.2, BINEX, NMEA 0183 v4.0. Передача данных через серийный, USB и TCP/IP порты. Поддержка NTRIP Caster/Client/Server
Коммуникационный слот	Установка встроенного Радио или GSM/GPRS модема
Порты и разъемы	1× RJ45, Ethernet 1× серийный порт RS232 Lemo 1× USB клиент (для подключения к ПК) 1× генератор внешней частоты 1× порт питания Lemo (одна основная и одна резервная линия питания) 1× UART & USB (для съемных коммуникационных устройств)
Температурный диапазон: Рабочий Хранения	от -40 до +65 °C от -40 до +80 °C
Влажность	100 %, соответствует ISO9022-13-06. ISO9022-12-04 и MIL STD 810G – 507.4-I

Для внесения атмосферных поправок при обработке данных линейно-угловых и спутниковых измерений на ГТС размещаются специализированные метеостанции, которые измеряют основные параметры атмосферы, такие как температура, давление и относительная влажность. В АСГМ обычно используются автоматизированные метеостанции Vaisala 534 WXT, Leica PAA-33X (Швейцария) [16]. Технические характеристики метеостанций приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Технические характеристики метеостанций

Параметр	Vaisala 534 WXT	Leica PAA-33X
Диапазон измерения температуры	от -52 до +60 °С	от -40 до +80 °С
Диапазон измерения относительной влажности	от 0 до 100 % с ошибкой ± 3 %	—
Диапазон измерения атмосферного давления	от 600 до 1 100 ГПа	от 0,05 до 0,11 МПа

Щелемеры. Неравномерность осадок с перекосами секций и элементов сооружений контролируется с помощью пространственных щелемеров, установленных на температурно-осадочных швах, один раз в полгода. Щелемеры могут быть двухосевыми или трехосевыми, с возможностью сбора данных в ручном или автоматизированном виде.

Механический щелемер состоит из двух пластиковых пластин [76]. Одна пластина непрозрачная и включает сетку. Другая пластина полупрозрачная и имеет набор перекрестий. Пластины закрепляются на противоположных сторонах трещины или стыка с перекрестием, установленным над центром сетки. Движение измеряется по расположению перекрестия по отношению к сетке (рисунок 1.13).

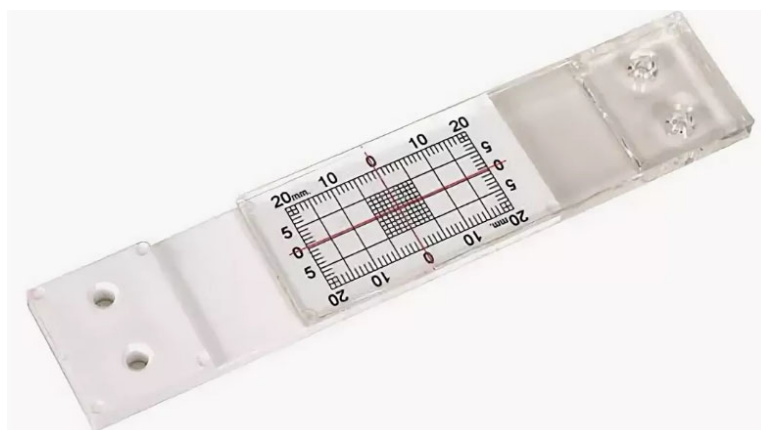


Рисунок 1.13 – Общий вид механического щелемера

Автоматизированный щелемер представляет собой цилиндрический корпус с датчиком смещения, установленный в зоне раскрытия деформационных швов в бетонных конструкциях гидротехнических сооружений и закрепленный стальными анкерами по обеим сторонам шва (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Схема размещения датчика перемещений накладного типа (щелемера)

Автоматизированные щелемеры имеют вибрирующие проволочные чувствительные элементы с термообработанными пружинами для снятия напряжений. Когда происходит смещение, на проволоку действуют силы растяжения, которые пропорциональны этому смещению [74].

Инклинометры – это устройства, измеряющие угол и направление наклона конструкций, показывающие отклонения от начального положения. Используются для получения точных данных о наклоне конструкций гидротехнических сооружений при строительстве и эксплуатации. Один из примеров инклинометрических датчиков является двухосевой инклинометр Leica Nivel 210 (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Инклинометр Leica Nivel 210, который используется в системах мониторинга ГТС

Принцип работы инклинометра. Горизонтальная плоскость инклинометра (чувствительный к наклону элемент) задается жидкостью в закрытой емкости, поверхность которой перпендикулярна вертикали независимо от ориентации элемента.

Наклон горизонта относительно чувствительного элемента измеряется опико-электронными средствами. Все оптические компоненты, используемые в инклинометре, крепятся к нижней стороне плоской стеклянной пластины. Пластина также образует дно емкости с прозрачной жидкостью. Через оптоэлектронные компоненты светящаяся поверхность светодиода отображается на позиционно-чувствительном фотодиоде. Свет от светодиода направляется снизу через плоское стекло и жидкость, полностью отражается от поверхности жидкости, а затем снова проходит через жидкость и плоское стекло. Наконец, фотодиод определяет положение падающего светового пятна относительно исходной точки, которое было отрегулировано и откалибровано точно в горизонтальной плоскости.

Плоская стеклянная пластина, служащая одновременно компонентом и опорой для самого чувствительного элемента, зажимается на металлическом основании в форме желоба. Датчик установлен на трех закаленных и отшлифованных круглых опорных поверхностях на нижней стороне основания. В опорных поверхностях в центре имеются сквозные отверстия для винтов. Инклинометр покрыт пластиковым кожухом, который служит, в первую очередь, как теплоизолятор, который предназначен для предотвращения внешних тепловых воздействий, вызывающих неравномерное тепловое расширение внутри датчика и, как следствие, ошибки измерения. Также установлен датчик температуры для контроля температуры инклинометра. Пузырьковый уровень на инклинометре позволяет оператору приблизительно задать горизонтальную плоскость. Более точная настройка выполняется электронным способом с помощью программного обеспечения перед началом измерения. Значения наклонов в двух взаимно перпендикулярных направлениях X и Y (в мрад, мм/м) и температура (в °C) непосредственно измеряются, затем эти данные поступают в специализированное программное обеспечение, где используются в дальнейшем для визуализации и анализа [73].

Гидронивелиры. С помощью системы гидростатического нивелирования производятся наблюдения за высотным положением конструкций сооружения и их отклонениями от начального положения.

Стационарные гидростатические системы устанавливаются преимущественно в помещениях, где сезонные колебания температур невелики и отсутствует неравномерный нагрев отдельных частей системы. Это позволяет значительно ослабить влияние основного источника ошибок при гидростатическом нивелировании, вызванного неодинаковой температурой жидкости в разных частях гидростатической системы.

На рисунке 1.16 показаны датчики гидростатического нивелирования фирмы Geokon.



Рисунок 1.16 – Общий вид датчика гидростатического нивелирования

Технические характеристики датчиков гидростатического нивелирования Geokon модель 4675 следующие:

- максимальная разница высотного положения датчиков в контуре 1,76 м (до 172,42 мбар);
- вывод показателей с точностью 0,025 % от максимальной разницы высотного положения датчиков в контуре;

- предел допустимой абсолютной погрешности, не более $\pm 0,1$ % от максимальной разницы высотного положения датчиков в контуре;
- температура окружающей среды от 0 до $+80$ °С.

1.5 Автоматизированные системы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений: состав, структура, специфика их развертывания

Автоматизированная система геодезического мониторинга является одной из важных частей АСДК. В зависимости от решаемых задач, АСГМ может включать по отдельности или в комплексе следующие основные типы оборудования:

- автоматизированный тахеометр;
- ГНСС-приемник;
- гидронивелир;
- инклинометр.

Дополнительно в АСГМ могут входить автоматизированные щелемеры, прямые и обратные отвесы, а также лазерные интерферометры для створных измерений.

Одним из вариантов реализации АСГМ является система спутникового геодезического мониторинга (ССГМ), которая обычно в своем составе имеет следующие элементы [57]:

- три опорных пункта ГНСС, установленных на наиболее стабильном основании; каждый из пунктов имеет в своем составе двухчастотный спутниковый приемник и антенну типа Choke Ring, принимающую сигналы ГНСС;
- пункты мониторинга, установленные на контролируемых точках. Каждый из этих пунктов оснащен двухчастотным или одночастотным спутниковым приемником с антенной, принимающей сигналы ГНСС (рисунок 1.17);
- автоматизированные метеостанции (метеодатчики) в количестве по числу спутниковых приемников или меньше, фиксирующие температуру, влажность и давление в точках приема радиосигналов ГНСС;
- диспетчерский пункт ССГМ в составе сервера и автоматизированного рабочего места (АРМ) для сбора, обработки и архивирования результатов измерений;

- программное обеспечение управления спутниковыми приемниками, вычисления смещений контролируемых точек и архивирования данных и предоставления информации о смещениях лицам, принимающим решения;
- каналы связи, обеспечивающие передачу измерительной информации от опорных пунктов и пунктов мониторинга в диспетчерский пункт;
- система бесперебойного электропитания (220 В) спутниковых приемников и вычислительно-коммуникационных средств.



Рисунок 1.17 – Спутниковая антенна, установленная на плотине ГЭС

Функционирование системы спутникового мониторинга ГТС заключается в синхронном приеме опорными станциями и станциями мониторинга измерительной информации со спутников ГНСС, вычислении координат контролируемых точек и их смещений с заданной периодичностью относительно условно стабильных пунктов. Пример схемы расположения опорных пунктов и точек спутникового мониторинга мостового перехода шлюзов гидроузла показан на рисунке 1.18.

ССГМ обладает достаточно высокой потенциальной точностью и широко применяется для структурного мониторинга, однако использование комплексной системы геодезического мониторинга на основе автоматизированных электронных тахеометров для наблюдений плановых и высотных перемещений ГТС в большин-

стве случаев предпочтительнее ввиду более высокой точности определения трехмерного положения контролируемых точек (рисунок 1.19).

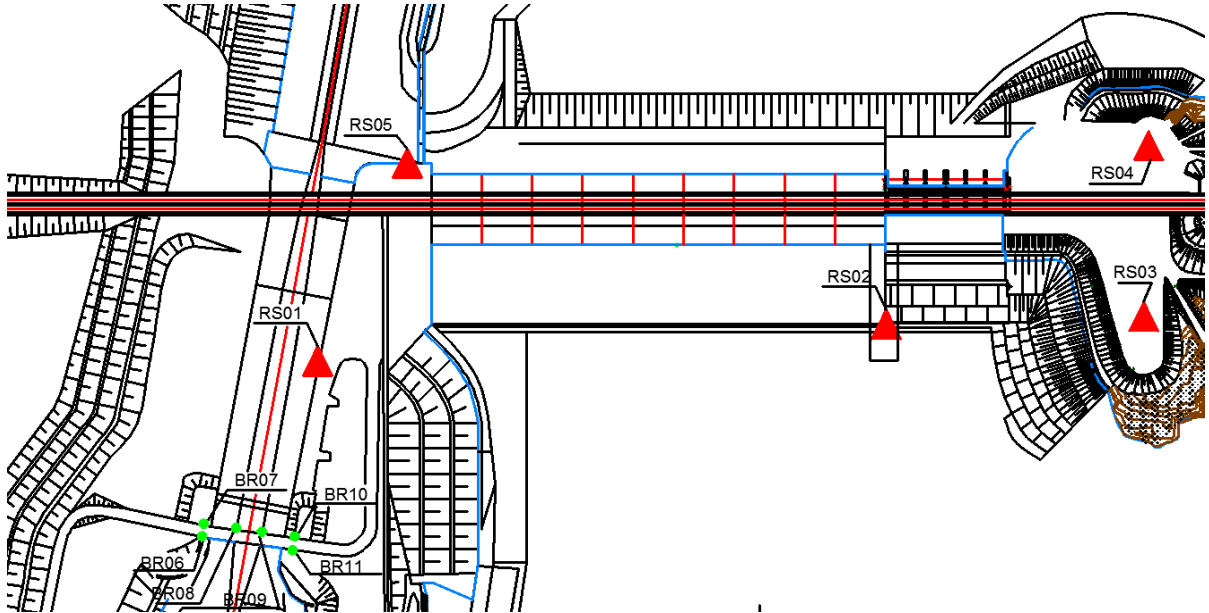


Рисунок 1.18 – Схема расположения опорных пунктов и точек спутникового мониторинга мостового перехода шлюзов гидроузла



Рисунок 1.19 – Станция автоматизированного тахеометра системы геодезического мониторинга

В таких комплексных системах ГНСС-приемники могут служить как для мониторинга перемещений конструкций, так и для контроля стабильности положения станций автоматизированных тахеометров, а также пунктов, на которых установлены опорные отражатели.

Комплексные АСГМ ГТС, как и АСДК в общем случае, включают нижний и верхний уровень.

В качестве специализированного программного обеспечения верхнего уровня, в зависимости от состава измерительных устройств системы, могут использоваться следующие программные комплексы:

- Leica GNSS Spider для управления спутниковым сегментом оборудования системы, сбора и обработки данных с ГНСС-приемников. Leica GNSS Spider – программный пакет для централизованного управления одиночной базовой станцией или сетью ГНСС-станций. Leica GNSS Spider имеет несколько модулей и может быть расширен за счет включения различных функций. Так, программный модуль Leica GNSS Spider Positioning позволяет применять технологию спутникового позиционирования в реальном времени или с постобработкой данных для отслеживания движения ГНСС-антенн базовых станций;

- Leica GeoMoS для управления электронными тахеометрами, метеодатчиками, инклинометрами, а также для сбора, обработки и анализа данных. Программное обеспечение Leica GeoMoS состоит из двух основных приложений (модулей): Monitor (рисунок 1.20) и Analyzer (рисунок 1.21).

Monitor – онлайн-приложение, отвечающее за контроль над датчиками, сбор данных, управление вычислениями и событиями. Analyzer – приложение, отвечающее за анализ, визуализацию и пост-обработку данных.

Для полного понимания причин любой выявленной деформации и улучшения прогнозирования ошибок Leica GeoMoS предоставляет возможность совместной обработки измерений наземного и спутникового геодезического позиционирования, а также данных, полученных с геотехнических и метеорологических датчиков;

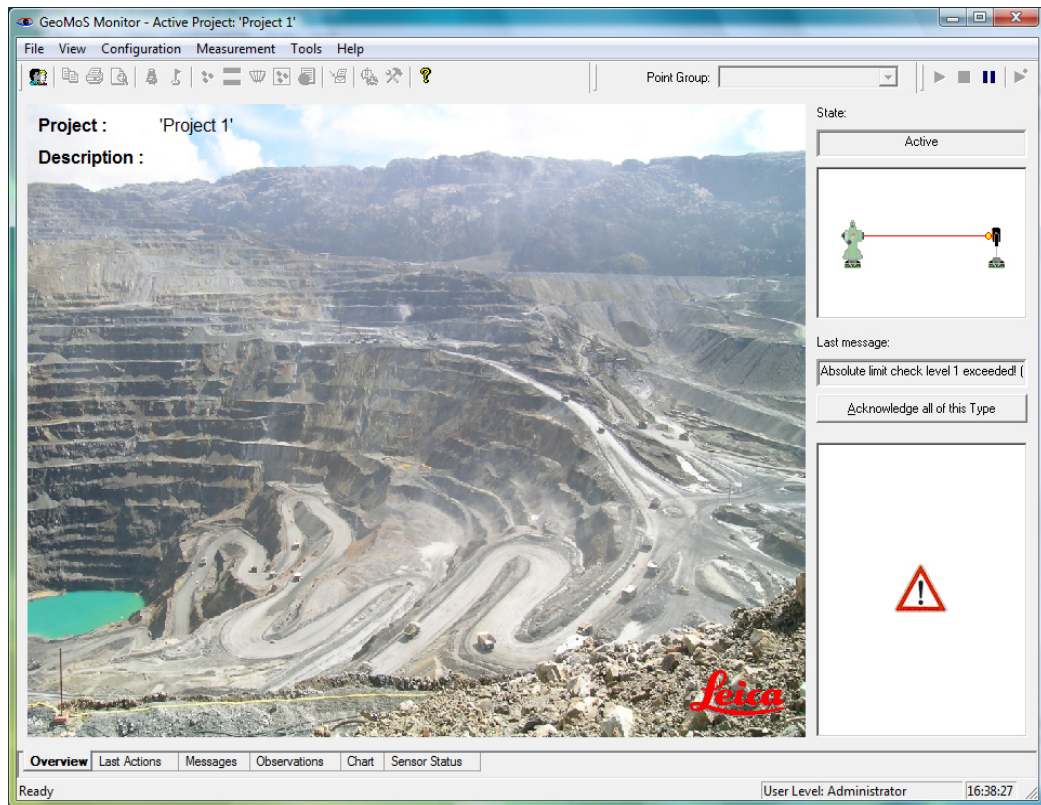


Рисунок 1.20 – Программное обеспечение Leica GeoMoS Monitor, применяемое в системах автоматизированного геодезического мониторинга

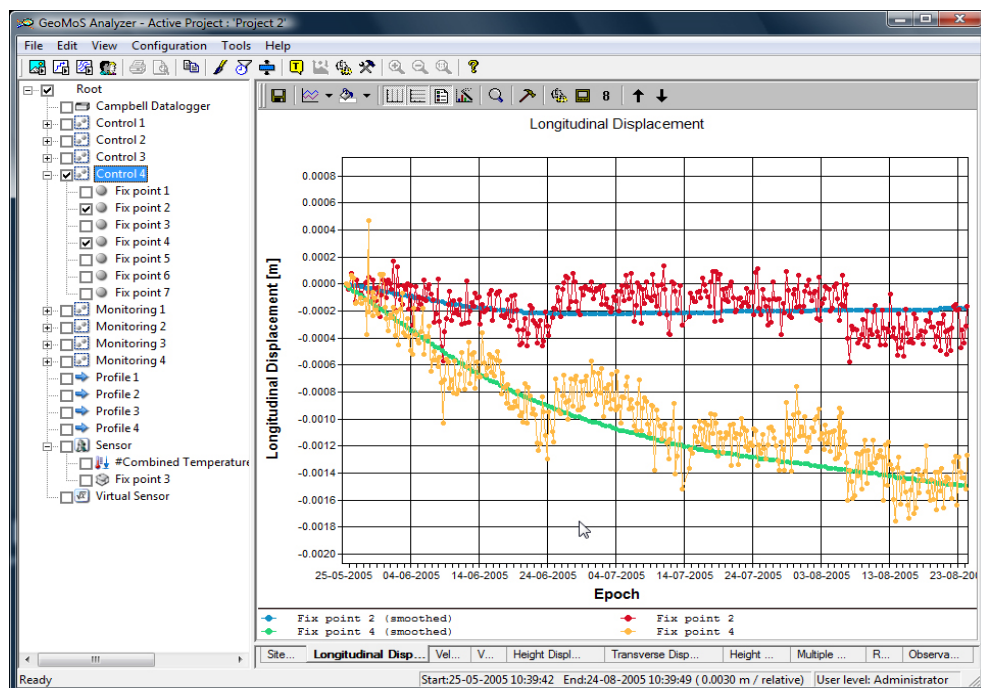


Рисунок 1.21 – Программное обеспечение Leica GeoMoS Analyzer, применяемое в системах автоматизированного геодезического мониторинга

– Sodis Building M осуществляет интеграцию различных измерительных систем в единый комплекс мониторинга напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, а также обеспечивает управление автоматизированной системой мониторинга технического состояния зданий и сооружений. Программное обеспечение хорошо интегрируется с другими системами для легкого представления пространственной информации, в том числе и с ИДС БИНГ-3.

1.6 Анализ существующих автоматизированных систем геодезического мониторинга на базе ГНСС-технологий в зарубежных странах и в России

Практическое применение ГНСС технологий для мониторинга деформаций инженерных сооружений, в частности ГТС, берет начало с 90-х гг. прошлого столетия, когда система глобального позиционирования GPS стала широко внедряться в сферу точных геодезических работ. Начиная с этого момента, в зарубежных странах и России активно реализуются проекты по развертыванию автоматизированных систем геодезического мониторинга на базе ГНСС-технологий.

Одним из таких уникальных объектов, на которых развернута АСГМ, является плотина Койна, расположенная в водоразделе реки Кришна в штате Махараштра, Индия [83]. Ее строительство началось в 1956 г., а в 1961 г. она была успешно введена в строй. Плотина Койна представляет собой каменное бетонное сооружение высотой 103 м и длиной 800 м с водосборной площадью 872 км² (рисунок 1.22).

После землетрясения 11 декабря 1967 г. с магнитудой 6,3 по шкале Рихтера активно ведутся геодезические наблюдения за деформациями плотины с помощью традиционных методов наблюдений, а с 2000 г. проводятся ГНСС-измерения для контроля стабильности земной поверхности, активного тектонического разлома и одновременно инженерного сооружения.

В 2000 г. на плотине Койна была создана сеть GPS, состоящая из 34 точек вдоль линии разлома и других областей деформации, окружающих плотину (рисунок 1.23).



Рисунок 1.22 – Общий вид плотины Койна

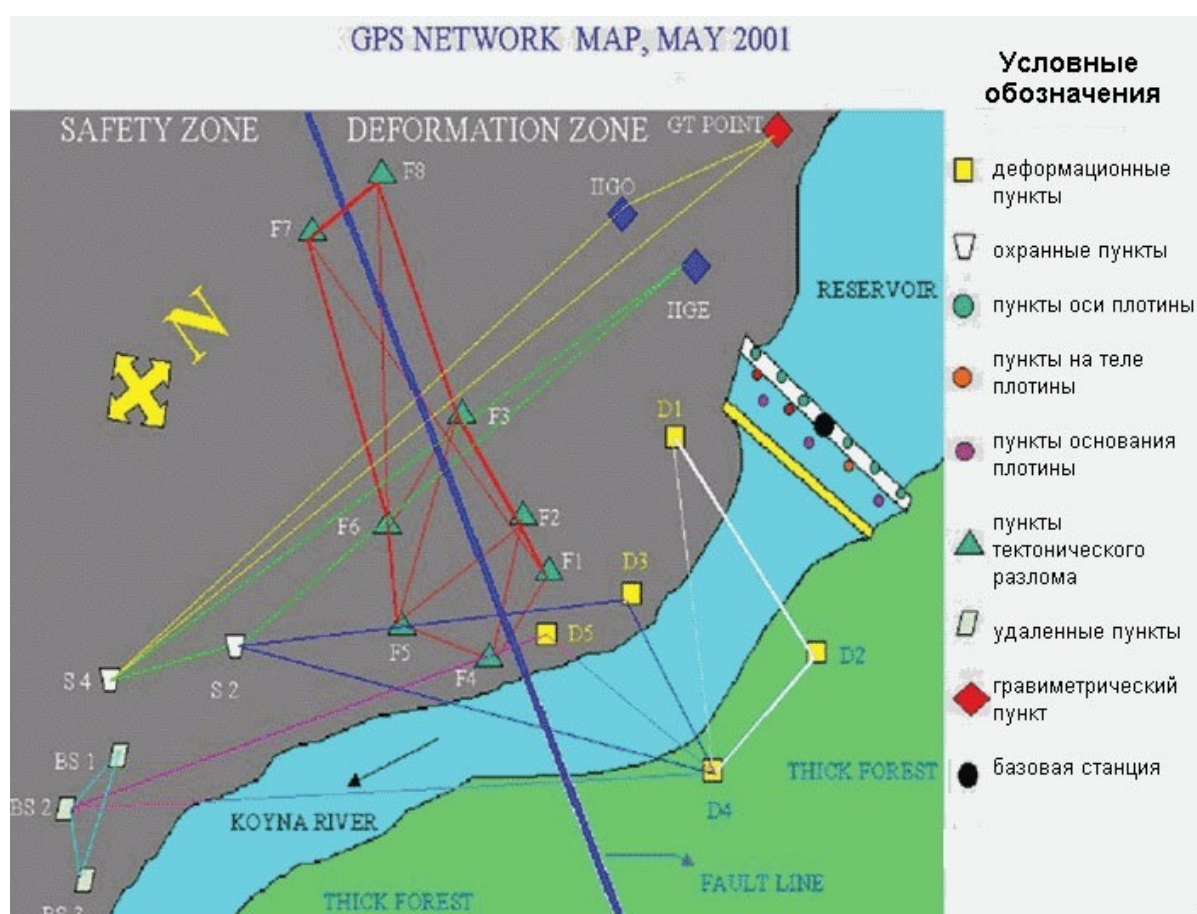


Рисунок 1.23 – Контрольная геодезическая сеть в районе плотины Койна (Индия) [83]

ГНСС-измерения выполнялись GPS-приемниками Trimble 4000 SSi с антенной Choke Ring и Trimble 5700 с антенной Zephyr фирмы Trimble Navigation в режиме «статика» отдельными циклами продолжительностью 6–8 часов с интервалом записи 15 с, маской по высоте 15° . С 2000 по 2004 г. выполнено десять циклов повторных измерений продолжительностью около трех недель.

Наблюдения за конструкцией плотины показали, что в зимне-весенний период плотина испытывает изгиб в горизонтальной плоскости, соответствующий смещению частей плотины в южном направлении, достигающий 10 мм. Неожиданное резкое уменьшение давления воды во время фазы ее сброса уменьшает нагрузку на конструкцию, провоцируя движения основания плотины. В результате вся конструкция значительно наклоняется или поворачивается, что приводит к смещениям ее вершины навстречу потоку. В летний период происходит смещение тела плотины в южном направлении, что, по предположениям, связано с быстрым повышением уровня воды (до 24 м) и наклоняет плотину по направлению течения.

Иная схема и программа контроля устойчивости плотины была применена при изучении деформаций в районе высокогорной арочной плотины Пакоима, штат Калифорния (рисунок 1.24).

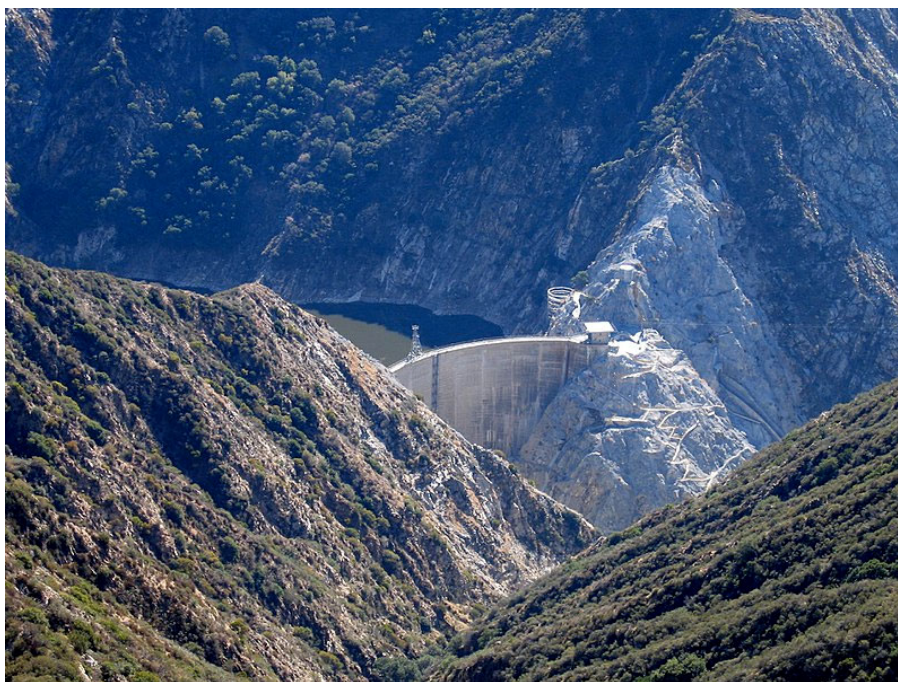


Рисунок 1.24 – Высокогорная арочная плотина Пакоима [81]

В сентябре 1995 г. на плотине Пакоима была развернута мониторинговая система, состоящая из трех постоянно действующих GPS-приемников и одного опорного GPS-приемника, удаленного на расстоянии 2,5 км от плотины [81]. Контроль устойчивости плотины выполнялся в режиме, близком к реальному времени, объединенными усилиями Геологической службы США и администрации округа Лос-Анджелес с привлечением данных наземной инфраструктуры Южно-калифорнийской объединенной GPS сети (SCIGN). При этом один из контрольных пунктов сети был размещен на соединении плотины с кристаллическим горным массивом, второй установлен в самом центре ее арки.

Рассматриваемая наблюдательная система состояла из двухчастотных GPS-приемников. Дискретность наблюдений была установлена равной 30 с. Данные накапливались в памяти приемников и передавались по GSM модемам один раз в сутки в Институт океанографии (Региональный центр обработки данных). Ежесуточная обработка была налажена с января 1996 г. При этом использовался программный пакет GAMIT. Результаты обработки продемонстрировали точность определений координат в плане 1 см и по высоте 2 см. Позднее с использованием точных эфемерид спутников были получены точности 4–6 и 12 мм, соответственно. Таким образом, результаты исследований показали, что применяемая технология мониторинга в почти реальном времени обработки суточных данных вполне удовлетворяет необходимым требованиям.

Система мониторинга плотины Пакоима описывается также в работе [85], в которой были сделаны выводы о пространственных смещениях части дамбы. Спектральный анализ временных рядов координат после исключения годовой гармоника выявил высокую корреляцию между температурой и смещениями плотины. К временным рядам была применена функция зависимости перемещений плотины от температуры. Остаточные деформации авторы связали с изменениями уровня водохранилища и аномальными перемещениями плотины.

В работе [78] описана технология мониторинга инженерных сооружений с использованием ГНСС, разработанная в Университетском колледже Лондона и осно-

ванная на учете влияния фазовой многолучевости, использовании фильтра Калмана и метода кумулятивной суммы (CUSUM). Особенностью технологии является то, что в обработку берутся только одночастотные фазовые измерения, что позволяет существенно снизить стоимость системы за счет применения сравнительно недорогих спутниковых приемников. При этом время инициализации системы должно составлять 24 часа, чтобы выполнить оценку влияния многолучевости. На этапе наблюдений разработанное авторами программное обеспечение GPSEM использовало эти данные для определения движения контрольных точек и производило фильтрацию временных рядов полученных координат.

Описанная в статье методология была опробована в системе мониторинга упомянутой выше плотины Пакоима. Из результатов анализа временных рядов координат на интервале четырех суток были получены следующие результаты:

- в течение суток не происходило никаких существенных смещений точек мониторинга, максимальное изменение их координат составило порядка 0,5 мм;
- в случае применения описанной методики в полном объеме (т. е. учета многолучевости, осуществления фильтрации Калмана и получения кумулятивной суммы), результаты определяются с высокой точностью в реальном масштабе времени, стандартные отклонения полученных временных рядов координат составили 0,1 мм;
- получена хорошая сходимость GPS-наблюдений с результатами геотехнических измерений.

Дополнительно авторами работы [78] приводятся результаты сравнения координат, полученных с помощью разработанного ими программного обеспечения GPSEM, с координатами, полученными с использованием программы SkiPro. Отмечаются взаимные расхождения полученных решений, достигающие 0,43 мм.

В работе [64] представлена сравнительная оценка точности контроля деформаций насыпной плотины Маврово (Болгария) с использованием традиционных (линейных, угловых, нивелирных) и спутниковых наблюдений. Точность линейных и угловых измерений составляла соответственно 0,5" и 1 мм на 1 км хода соот-

ветственно. Точность нивелирных измерений характеризовалась среднеквадратической ошибкой 0,7 мм на 1 км хода. Экспериментальные GPS измерения на плотине были выполнены в 2009 г. Результаты сравнения показаны в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Результаты сравнения координат контрольных точек, полученных с применением спутниковых и линейно-угловых измерений

Точка	Y , м	X , м	dy , м	dx , м
110	1031,4488	1070,6479	-0,0012	0,0001
102	852,3848	991,0740	0,0034	-0,0012
103	1041,0440	918,9107	-0,0022	0,0020
106	975,5610	815,0943	-0,0008	-0,0016
107	1000,0068	999,9950	0,0039	0,0003

Из таблицы 1.11 следует, что взаимные отклонения определений координат с использованием GPS и классических линейно-угловых измерений находились в пределах первых миллиметров (1–4 мм).

В рассматриваемой работе [64] также приведены расхождения координат, полученных из GPS-измерений методом быстрой статики с продолжительностью 5–10 минут и дискретностью записи данных 1 с, и координат, полученных классическим методом. Полученные расхождения достигали величины в 1 см.

Проведенные сравнительные оценки позволили авторам сделать следующие выводы:

- эффективность применения спутниковых технологии для контроля устойчивости насыпных дамб находится в прямой зависимости от расположения контрольных пунктов;
- большие расхождения обусловлены положением отдельных пунктов в местах присутствия препятствий, ограничивающих видимость спутников;
- рекомендуется уделять особое внимание центрированию антенн ГНСС-приемников;
- продолжительность сеансов ГНСС измерений является одним из важных факторов обеспечения установленной точности;

– рекомендуется выполнять определения высот с использованием точного геометрического нивелирования.

Заметим, что указанные выводы сегодня уже достаточно известны и отражены в отечественной нормативной литературе.

В работе [67] приводятся результаты наблюдений за пространственными смещениями плотины Ататюрк в Турции в течение трехлетнего периода. В наблюдениях использовались традиционные линейно-угловые измерения, ГНСС-измерения, точное тригонометрическое и геометрическое нивелирование, лазерное сканирование и спутниковая радиолокационная интерферометрия (InSAR), измерения с помощью обратных отвесов, наклономеров (инклинометров), а также геотехнические измерения (экстензометры, пьезометры и др.).

Полученная точность определения смещений традиционными измерительными средствами находилась в пределах 1 см. Было выражено сомнение в достаточности точности определения вертикальных смещений с помощью ГНСС-измерений.

В работе [72] представлены результаты анализа различных технологий деформационного мониторинга плотины Икпоба (Нигерия), в том числе на основе использования ГНСС-измерений. Описанная в работе система мониторинга представляла собой первый опыт применения ГНСС-технологии контроля деформаций гидротехнических сооружений в Нигерии. Наблюдения проводились в период с 2008 по 2010 г., длины базовых линий в развернутой сети мониторинга плотины не превышали 3 км. Авторы отмечают, что полученная максимальная погрешность определения смещений не превышала 5 мм. Делается вывод о высокой точности ГНСС мониторинга деформаций плотины как в плане, так и по высоте, особенно для коротких базовых линий.

В работе [66] рассматривается построение системы контроля деформаций плотины Мактакак в Канаде с использованием АСГМ на базе ГНСС технологий. В состав развернутой системы (рисунок 1.25) вошли две опорных станции, одна из которых была установлена на коренном берегу, а другая на острове, а также четыре мониторинговых станций, установленных попарно на двух водосливных плотинах.



Рисунок 1.25 – Система мониторинга плотины ГЭС Мактакак [66]

Стоит отметить, что вблизи мониторинговых станций были расположены массивные конструкции, препятствующие приему спутникового сигнала и вызывающие многолучевость. Из результатов первых пяти месяцев эксплуатации системы мониторинга авторы работы сделали вывод о достигнутой субмиллиметровой точности.

Для обработки ГНСС-измерений использовалось программное обеспечение mmVu, разработанное компанией Gemini Navsoft Technologies. Данные ГНСС записывались с дискретностью 5 с и обрабатывались только суточные измерения, которые затем фильтровались на интервале в семь суток.

Программное обеспечение mmVu за счет фильтрации результатов, по утверждению авторов, позволяет достигать миллиметровой точности за период наблюдений от 12 до 24 часов. Технология обработки, реализованная в mmVu, основана на применении фильтра Калмана для обработки доплеровских наблюдений и позволяет добиться высокой частоты обновления результатов, что важно для таких динамических критически важных объектов, как плотины высоконапорных гидроэлектростанций.

В районах, где различие высот между опорной станцией и станциями мониторинга на плотине может достигать сотен метров, программное обеспечение mmVu, по мнению его разработчиков, позволяет существенно снизить остаточное влияние тропосферы за счет использования высокой частоты записи данных и доплеровской фильтрации с временной задержкой (Time-Delayed Doppler TDD filter).

В работе [3] рассматривается автоматизированная система деформационного мониторинга Саяно-Шушенской ГЭС, созданная на основе спутниковых геодезических приемников в 2014 г. Эта система является частью комплекса геодезических и геотехнических программно-аппаратных средств и предназначена для наблюдений за плановыми смещениями гребня плотины. Схема размещения элементов системы приведена на рисунке 1.26.



Рисунок 1.26 – Система мониторинга плотины Саяно-Шушенской ГЭС [3]

На базовых станциях системы деформационного мониторинга установлены ГНСС-приемники Leica GR10, а на станциях мониторинга – приемники Leica

GMX902GG. Для сбора и обработки спутниковых измерений используется программное обеспечение Leica GNSS Spider. Программный комплекс Leica GeoMoS обеспечивает анализ данных мониторинга, а для визуализации результатов применяется пользовательское программное обеспечение Sentris Viewer разработки компании «Инжиниринговый центр ГФК».

В таблице 1.12 приведена сводка качественных характеристик систем контроля движений и деформаций плотин ГЭС, рассмотренных в настоящем разделе.

Таблица 1.12 – Сравнительный анализ технических характеристик систем геодезического мониторинга плотин

Объект мониторинга	Длины базовых линий (км)	Внутренняя точность (мм)*	Метод
Плотина Пакоима (США)	< 2,5	10 мм в плане, 20 мм по высоте; с использованием точных эфемерид 4-6 мм в плане и 12 мм по высоте	ПО **
Плотина Пакоима (США)	< 0,2	0,1 мм	РВ***
Плотина Маврово (Болгария)	< 0,2	4 мм	ПО
Плотина Ататюрк (Турция)	< 3	10 мм	ПО
Плотина Икпоба (Нигерия)	< 1	5 мм	ПО
Плотина Мактакак (Канада)	< 0,5	0,2 мм	РВ
Плотина СШГЭС (Россия)	< 1,5	3 мм	ПО
* – средняя квадратическая ошибка, полученная в отчетах обработки с использованием коммерческого программного обеспечения; ** – постобработка; *** – реальное (псевдо-реальное) время.			

Из таблицы 1.12 следует, что рассмотренные системы контроля движений и деформаций плотин ГЭС по типу обработки данных можно разделить на две группы:

– системы с получением результатов мониторинга в автоматизированном режиме в реальном (псевдореальном) времени (РВ);

– системы с получением результатов из постобработки (ПО).

При использовании обоих представленных типов обработки данных технология спутниковых геодезических измерений позволяет получать точность в несколько миллиметров, а в случае применения различных методов дополнительной обработки и фильтрации достигать точность менее миллиметра [1, 27]. Полученные в изученных примерах результаты дают основание сделать вывод о соответствии ГНСС-технологии требованиям к точности контроля пространственных перемещений ГТС на грунтовых основаниях [53].

1.7 Выводы по первому разделу

В первом разделе проанализированы методы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений, которые применяются в настоящее время. Сочетание методов и состав комплексной системы геодезического мониторинга подбираются для каждого конкретного объекта контроля в зависимости от специфики сооружений и целей мониторинга, требуемой периодичности и точности.

Например, такие стратегически важные и опасные инженерные сооружения как, например, плотины гидроэлектростанций нуждаются в непрерывном контроле. В последнее время развитие получили автоматизированные системы мониторинга ГТС. Автоматизация геодезических измерений в системах мониторинга ГТС приводит к сокращению трудозатрат, повышению частоты и оперативности получения данных о смещениях ГТС, что, в свою очередь, позволяет предотвратить наступление нежелательных событий или минимизировать их влияния и тем самым повысить безопасность сооружений и прилегающих территорий.

Кроме этого, в первом разделе были 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.

Из методов ГНСС-наблюдений для геодезического мониторинга ГТС в автоматизированных системах используется зачастую относительный статический ре-

жим и в меньшей степени режим реального времени. Режим точного точечного позиционирования для геодезического мониторинга в настоящее время не развит как в России, так и за рубежом, наблюдается недостаток методик мониторинга ГТС с использованием PPP как для определения смещений элементов конструкций ГТС, так и для контроля пространственного положения опорных пунктов и станций автоматизированных тахеометров.

2. ПРЕДПОСЫЛКИ И ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2 МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИОННОГО НАГНЕТЕНИЯ

2.1 Общие сведения о строящейся Загорской ГАЭС-2

Комплекс сооружений Загорской ГАЭС-2 расположен у подножия левобережного склона реки Кунья (левый приток реки Дубны) в 900 м выше по течению реки от существующей Загорской ГАЭС (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Действующая Загорская ГАЭС и строящаяся Загорская ГАЭС-2

Строительство комплекса сооружений Загорской ГАЭС-2 в 2007 г., к 2011 г. объем всех выполненных работ составлял 50 %, к 17 сентября 2013 г. на объекте было выполнено более 90 % всех работ, смонтированы два агрегата (№ 7 и 8), закончено строительство двух деривационных водоводов, в эксплуатационном режиме находились все сопрягающие сооружения станции, а также все фрагменты станции, примыкающие к реверсивному каналу, и все элементы этого канала [42].

Основные параметры строящейся Загорской ГАЭС-2 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры строящейся Загорской ГАЭС-2

Местоположение	Московская обл., Сергиево-Посадский район, пос. Богородское
Источник водообеспечения	р. Кунья, приток р. Дубны
Мощность в генераторном режиме, МВт	840
Мощность в режиме энергопотребления, МВт	1 000
Число обратимых агрегатов (насос-турбины)	4
Напор нетто в генераторном режиме, м • максимальный; • минимальный; • расчетный	110,0 92,0 100,0
Напор нетто в насосном режиме, м • максимальный; • средний; • расчетный	115,5 105,0 97,5
Рабочие емкости бассейнов суточного регулирования, млн м ³	11,9
Число часов работы, ч • в генераторном режиме; • в двигательном режиме; • в режиме СК	3,5 4
Выработка электроэнергии при разряде в сутки (лето/зима), ГВт ч	2,9/2,8
Потребление электроэнергии при заряде в сутки (лето/зима), ГВт ч	3,9/3,8
Годовая выработка электроэнергии, млн кВт ч	1 000
Годовое потребление электроэнергии, млн кВт ч	1 350

В соответствии с проектной документацией в состав основных сооружений Загорской ГАЭС-2 входят:

- верхний аккумулирующий бассейн;
- реверсивный водоприемник, встроенный в тело ограждающей дамбы верхнего бассейна с сопрягающими подпорными стенами;
- четыре нитки сталежелезобетонных открытых напорных водоводов с внутренним диаметром 7,50 м;
- станционный узел, включающий в себя здание станции с реверсивным каналом, монтажную площадку с трансформаторной мастерской, помещения пусковых тиристорных устройств, служебно-производственный корпус и другие сооружения;

- нижний аккумулирующий бассейн, организованный расширением существующего нижнего бассейна Загорской ГАЭС;
- сооружения выдачи мощности.

На рисунке 2.2 показан ситуационный план расположения сооружений Загорской ГАЭС-2.

Верхний бассейн расположен на водоразделе левого берега реки Куньи, на территории, примыкающей с юга к существующему верхнему бассейну Загорской ГАЭС. Геометрия бассейна в плане определялась для получения минимальных объемов работ по насыпи дамбы и вмещении проектного полезного объема воды в размере 11,9 млн м³. Бассейн устраивается в дамбе обвалования. Примыкание дамбы верхнего бассейна ГАЭС-2 к существующему верхнему бассейну Загорской ГАЭС-1 выполнено на ПК 9 на ПК 28 по оси существующей дамбы.

Конструкция дамбы предусматривает максимальное использование грунтов полезных выемок – из котлована здания ГАЭС, водоприемника, напорных водоводов, нижнего бассейна. Для укладки в тело дамбы используются моренные суглинки, смеси моренных и покровных суглинков, смеси моренных суглинков и песков, пески. С напорной стороны предусмотрен экран из моренных суглинков толщиной от 3,0 до 5,0 м. Заложение верхового откоса на всем протяжении дамбы 1 : 7, за исключения участка с ПК 5 до ПК 15,5 с заложением верхового откоса 1 : 3,5. Заложение низового откоса 1 : 3,5.

Тело дамбы однородное, на всем протяжении дамбы предусмотрены горизонтальный и вертикальный дренажи для понижения депрессионной кривой, обеспечения устойчивости низового клина дамбы, снятия порового давления и исключения выкачивания фильтрационного потока на низовой откос.

Крепление верхового откоса на участке с ПК 5 до ПК 15,5 с заложением верхового откоса 1 : 3,5 принято: ниже УМО из сборных железобетонных плит толщиной 0,17 м, бетон В25, выше УМО из монолитного железобетона толщиной 0,2 м, бетон В15 F300. Под бетонным креплением предусмотрен слой дренажа из гравия фракции 5–70 мм толщиной 500 мм, в плитах предусмотрены отверстия диаметром 200 мм, засыпанные гравием для выпуска воды при сработке уровня бассейна [42].

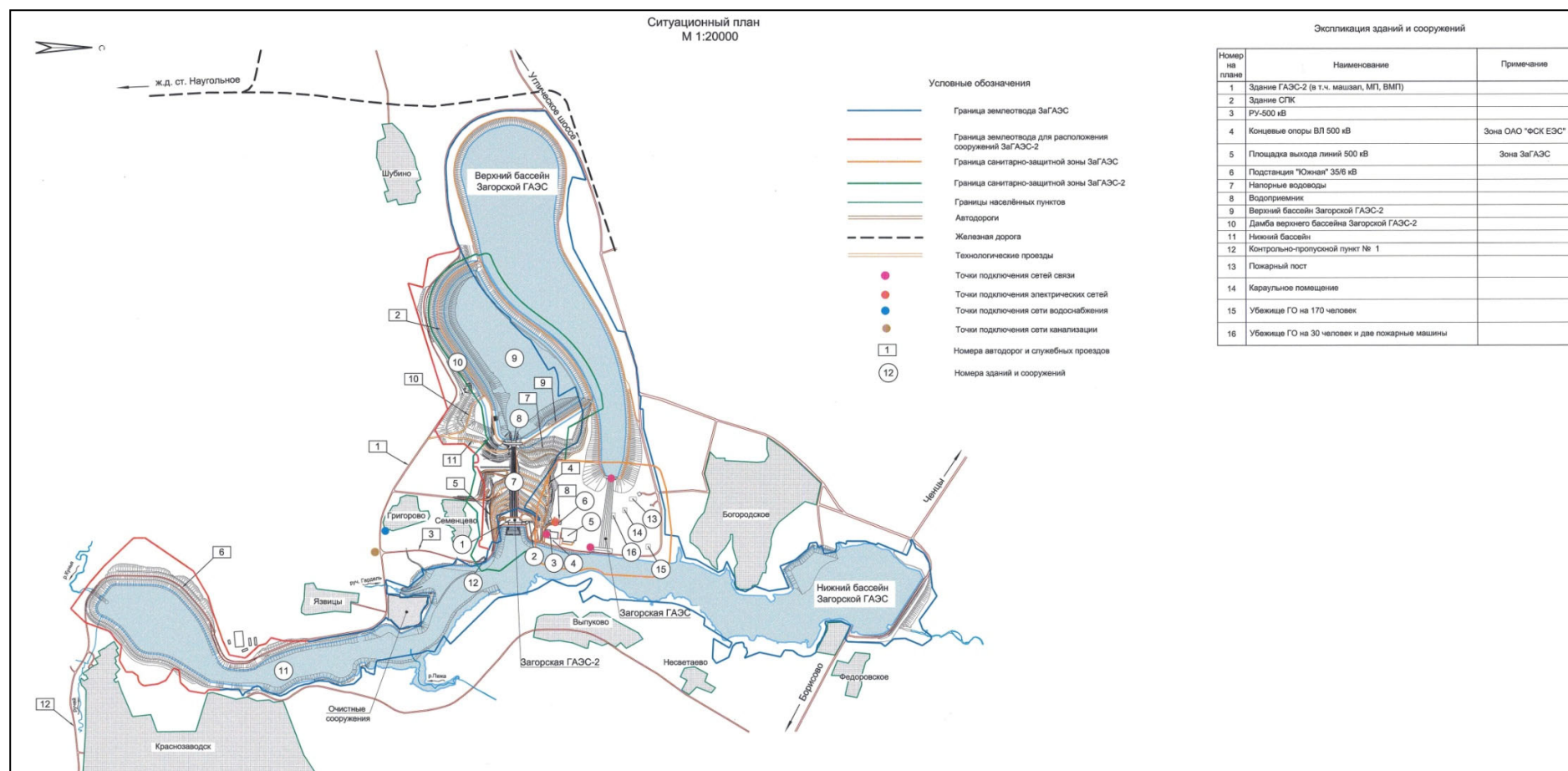


Рисунок 2.2 – Ситуационный план расположения сооружений Загорской ГАЭС-2 [42]

На остальных пикетах дамбы заложение верхового откоса принято 1 : 7, в качестве крепления откосов принято крепление из песчано-грунтовой смеси (ПГС), обогащенной камнем с расчетным диаметром 132 мм, толщина крепления 1,6 м.

Низовой откос дамбы выполнен с заложением 1 : 3,5 и обеспечивает общую устойчивость дамбы и надежную эксплуатации крепления откоса посевом трав по растительному грунту.

Ширина дамбы по гребню принята 11,0 м из условий организации служебного проезда и размещения ограждения КСБ. Ширина проезжей части при этом 4,5 м, ширина обочин 1,5 м. На гребне устанавливаются ограждение КСБ и опоры охранного освещения. Покрытие автодороги по гребню выполняется из черного щебня, ограждающие конструкции металлические барьерного типа.

Расчетные параметры верхнего бассейна Загорской ГАЭС-2 представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Расчетные параметры верхнего бассейна Загорской ГАЭС-2

Длина дамбы по гребню, м	3 388
Высота дамбы, м:	
Максимальная	40
Минимальная	14
Отметка гребня, м	269,00
Глубина верхнего бассейна,	
Максимальная	38,9
Минимальная (при сработке)	2,0
Ширина дамбы по гребню, м	11,0
Ширина служебного проезда по гребню, м	4,5
Верховой откос	
Заложение / Крепление	1 : 3,5 / железобетон
	1 : 7 / ПГС с камнем
Низовой откос	
Заложение / Крепление	1 : 3,5 / Посев трав, водоотвод с откосов
Ширина акватории максимальная, м	1 090
Длина акватории, м	1 870

Реверсивный водоприемник расположен в напорном фронте, встроен в тело грунтовой дамбы и решен по схеме руслового здания ГЭС. Для сопряжения дамбы с водоприемником с низовой и верховой стороны предусмотрены подпорные стены

уголкового типа (I яруса). Для уменьшения нагрузки на нижележащий склон грунтовая дамба выполнена до отметок 242,50 м, напорный фронт с отметкой 242,50 м создан ячеистыми подпорными стенами II яруса, примыкающими к водоприемнику с обеих сторон. В таблице 2.3 приведены основные параметры водоприемника.

Таблица 2.3 – Основные параметры водоприемника Загорской ГАЭС-2

Высота, м	48
Длина вдоль потока, м	71,1
Ширина поперек потока, м	78,7
Количество водоприемных отверстий, шт	4
Расход воды через 1 отверстие в турбинном режиме, м ³ /с	236,5
Отметка порога, м	230,00
Отметка гребня, м	269,00

Напорные водоводы. Четыре нитки открытых сталежелезобетонных напорных водовода (по одной нитке на каждый агрегат) расположены между водоприемником и зданием ГАЭС.

Конструкция монолитного сталежелезобетонного напорного водовода принята по аналогии с конструкцией Загорских и Круонисских водоводов. В плане водоводы имеют прямолинейное очертание, расстояние между осями переменное: от 12 м у водоприемника до 22 м у здания ГАЭС. Длина каждой нитки водоводов 769,0 м. Каждый напорный водовод разрезан температурными швами на 20 секций. В вертикальном профиле водоводы трасса в пределах секций 1–11 имеет радиус кривизны по оси 2 400,0 м, далее прямолинейный участок под углом ~ 10,3°, сопряжение со зданием ГАЭС выполнено по радиусу 22,5 м, длины всех ниток водоводов одинаковые. Конструктивно каждый водовод состоит из 18-рядовых 40-метровых секций (С-1–С-18) и двух 20-метровых компенсаторных секций (КС-0 и КС-19) в примыкании к водоприемнику и зданию ГАЭС. 18 обычных секций опираются на свайные ростверки. Секция КС-0 одним концом опирается на водоприемник, а другим – на специальную опору на свайном ростверке. Секция КС-19 опирается на здание ГАЭС и специальную опору.

В таблице 2.4 приведены основные параметры напорных водоводов.

Таблица 2.4 – Основные параметры напорных водоводов Загорской ГАЭС-2

Диаметр водовода, м	7,5
Число ниток, шт.	4
Максимальный статический напор в начале водовода, м	33
Максимальный статический напор в конце водовода, м	128,5
Расчетный напор в конце водовода, с учетом гидроудара, м	175
Расчетный расход в генераторном режиме, м ³ /с	236,5

Здание ГАЭС находится на расстоянии 834 м от оси водоприемника и расположено между двумя глубокими оврагами. В плане здание врезано в склон левого берега, что дало возможность разрабатывать котлован и бетонировать здание под защитой целика грунта, без устройства насыпной перемычки в условиях действующего нижнего бассейна с ежесуточной глубиной сработки 9 м. Станционный узел включает в себя машинное здание ГАЭС, блок монтажной площадки, временную монтажную площадку, помещения пусковых тиристорных устройств № 3 и № 4, сопрягающие подпорные стены правого берега, реверсивный канал, верхние подпорные стены.

Основная монтажная площадка размещена с левой стороны машинного зала и является непосредственным его продолжением. Общая протяженность зданий 142,0 м, в том числе машинный зал 100,7 м. В здании ГАЭС установлены четыре обратимых гидроагрегата с радиально-осевыми насос-турбинами РОНТ/115-812-В-630 диаметром 6,30 м и двигатель-генераторами СВО-1025/245-40УХЛ4. Расстояние между осями агрегатами 22,0 м. Здание станции Загорской ГАЭС-2 запроектировано в виде неразрезной бетонной конструкции, монтажная площадка и временная монтажная площадка отрезаны деформационными швами.

Площадка для размещения и прокатки трансформаторов расположена со стороны входа турбинных водоводов на отметке 149,85 м. Здесь же размещены порталы и электротехническое оборудование выдачи мощности. Спиральная камера гидромашины металлическая, сварная, круглого сечения, с углом охвата 351°. От-

сасывающая труба принята изогнутой со специальной формой колена, обеспечивающей плавный поворот потока в двух рабочих режимах – турбинном и насосном.

Машинный зал оборудован двумя мостовыми кранами пролетом 18,0 м и грузоподъемностью 320 т. Рабочая длина монтажной площадки 35,0 м, ширина 23,50 м.

Со стороны верхнего бьефа к зданию ГАЭС на отметке 149,85 м примыкает площадка, где размещены четыре главных трансформатора, трансформаторы собственных нужд и электротехническое оборудование выдачи мощности на КРУЭ [42].

Нижний аккумулирующий бассейн. Нижним бассейном Загорской ГАЭС-2 служит существующий нижний бассейн Загорской ГАЭС. Дополнительная емкость образуется за счет дноуглубления и выемки вдоль береговой линии (в основном левого берега) существующего нижнего бассейна и выемки на широкой части поймы реки Куньи перед верховой плотиной в районе города Краснозаводска. Сопряжение реки Куньи с нижним бассейном выполняется бетонным быстротоком, обеспечивающим пропуск паводковых вод реки Куньи.

Длина общего нижнего бассейна Загорской ГАЭС-2 составляет ~ 9,2 км. Условно зону дополнительной емкости нижнего бассейна можно разделить на четыре участка.

Первый участок. Длина ~ 1,25 км, расположен в пойме реки Куньи в районе г. Краснозаводска и выполнен в выемке с отметкой дна 151,50 м. Ширина акватории ~ 750 м. Правый берег пригружается насыпью на отметке 172,00 м для обеспечения устойчивости склона при выполнении глубокой выемки. Высота отсыпаемого банкета 7,5 м.

В пределах участка выполняется сопряжение реки Куньи с нижним бассейном железобетонным быстротоком с водобойным колодцем. Расчетный расход реки Кунья принят 1 % обеспеченности 96,7 м³/с.

Второй участок. Длина участка ~ 0,9 км, ширина акватории ~ 200 м, отметка дна 149,50 м. Нижний бассейн на этом участке представляет собой канал со скоростями воды 0,75–1,0 м/с (при толщине льда 1,0 м). Существующие отметки рельефа – 165,0–170,0 м.

Третий участок. Длина участка ~ 800 м, ширина акватории ~ 300 м, отметка дна 151,50 м. Нижний бассейн на этом участке также представляет собой канал со скоростями воды 0,75–1,25 м/с (при толщине льда 1,0 м). Существующие отметки рельефа – 160,0–170,0 м.

Четвертый участок. Длина участка ~ 2,2 км, ширина акватории ~ 350–400 м, отметка дна 149,25 м. Нижний бассейн на этом участке также представляет собой канал со скоростями воды 0,75–1,25 м/с (при толщине льда 1,0 м). Существующие отметки рельефа – 160,0–170,0 м.

2.2 Технический инцидент при строительстве Загорской ГАЭС-2

2.2.1 Общие сведения о техническом инциденте.

Меры по предотвращению технического инцидента

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, утром 18 сентября 2013 г. была обнаружена существенная деформация положения здания станции (рисунок 2.3).

Первоочередной задачей по ликвидации технического инцидента стало возведение временной перемычки реверсивного канала и понижение уровня воды в котловане здания ГАЭС-2. Также для предотвращения дальнейших деформаций в период с 18.09.2013 по 01.08.2014 были выполнены работы по стабилизации сооружений станционного узла Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания [23].

В период стабилизации и восстановления здания ГАЭС с 18.09.2013 по настоящее время осуществлялся мониторинг гидротехнических сооружений станционного узла Загорской ГАЭС-2. В состав мониторинговых работ входили следующие мероприятия:

- проведение визуальных и инструментальных натурных наблюдений;

- ведение электронной базы данных натурных наблюдений информационно-диагностической системы БИНГ;
- осуществление оценки состояния гидротехнических сооружений.

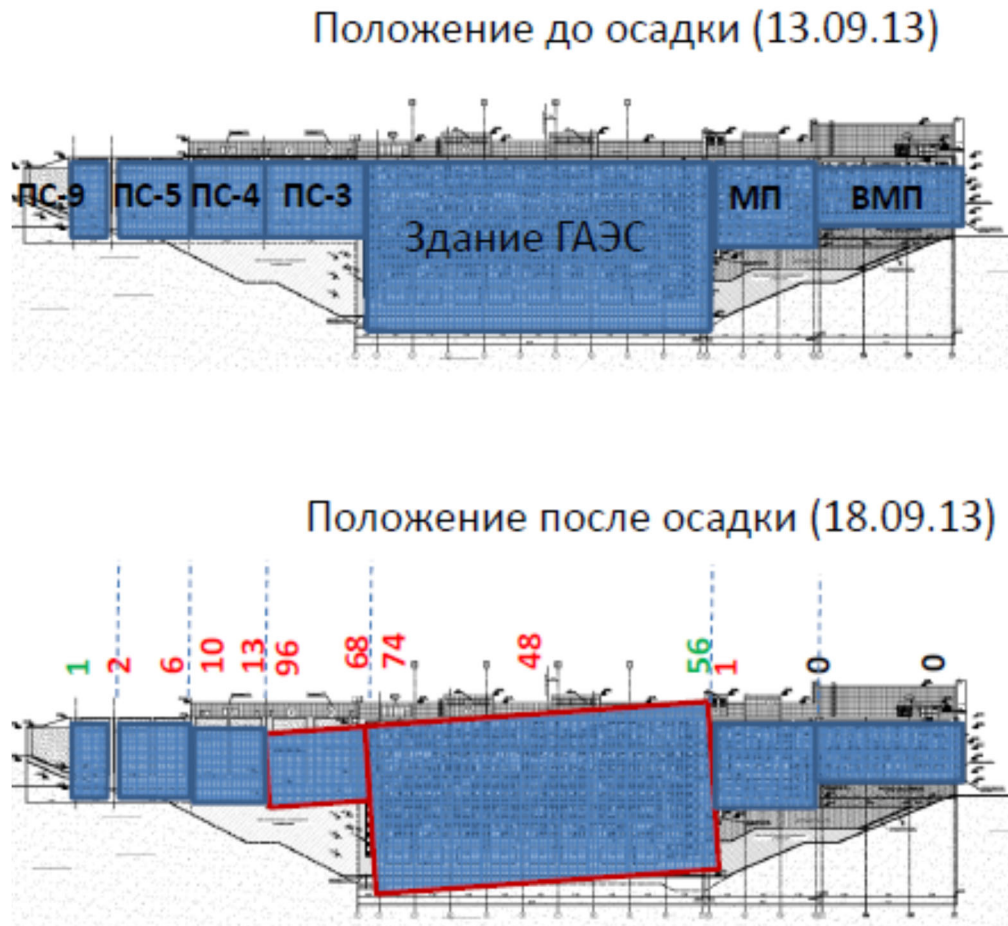


Рисунок 2.3 – Деформации здания станции Загорской ГАЭС-2
(размеры представлены в сантиметрах)

Состав и периодичность натурных наблюдений определялись, исходя из требований нормативной документации в части обеспечения необходимого контроля за надежностью и безопасностью гидротехнических сооружений, с учетом фактического состояния ГТС и установленной контрольно-измерительной аппаратуры.

В состав инструментальных наблюдений входили:

- наблюдения по закладной «струнной» КИА;
- наблюдения по фильтрационной КИА;

- наблюдения за стабильностью плановой и высотной опорных геодезических сетей;

- наблюдения за осадками;
- наблюдения по обратным отвесам;
- наблюдения по щелемерам.

Для контроля показателей напряженно-деформированного состояния, фильтрационного режима наклонами и деформациями гидротехнических сооружений были установлены закладные датчики измерения показателей состояния «струнного» типа.

Методика проведения наблюдений по закладной «струнной» КИА. Проведение наблюдений по «струнной» контрольно-измерительной аппаратуре производится с помощью переносных считывающих устройств (периодомеров), в соответствии с инструкцией к ним. Снятие показаний преобразователей производилось в следующем порядке:

- с помощью проводов с зажимами типа «крокодил» последовательно подключают периодомер к выводам кабеля от преобразователей;
- показания преобразователя, высвечиваемые на табло периодомера, сравнивают между собой при 3–4 импульсах вызова. Если при этом изменяются только цифры после запятой (десятые доли мкс) или изменяются на ± 1 –2 единицы целые значения (единицы мкс), то замер считается нормальным и записывается в журнал наблюдений. Если показания изменяются на большую величину и к тому же скачкообразно, следует проверить кабельные коммуникации преобразователя.

Методика проведения наблюдений по фильтрационной КИА. Для контроля показателей фильтрационного режима в теле и основании гидротехнических сооружений были установлены пьезометры опускных, пьезометры закладных напорных, пьезометры закладных безнапорных, расходомеров.

Измерение уровней воды в опускных пьезометрах осуществляется с помощью рулетки и лота, оснащенного хлопущкой, свистком или электроконтактным прибором.

Измерения давления воды напорных пьезометров осуществлялось с помощью образцовых манометров, устанавливаемых на оголовки напорного пьезометра.

Измерения фильтрационных расходов осуществлялись по мерным водосливам путем измерения уровня воды над порогом водослива.

Измерение уровня воды выполнялось два раза, и при расхождении замеров свыше 2 см производился дополнительный контрольный замер. Среднее значение двух близких замеров принималось в качестве измеряемой величины.

Методика проведения наблюдений за стабильностью плановой и высотной опорных геодезических сетей.

Плановая опорная сеть является общей для Загорской ГАЭС и Загорской ГАЭС-2 (рисунок 2.4).

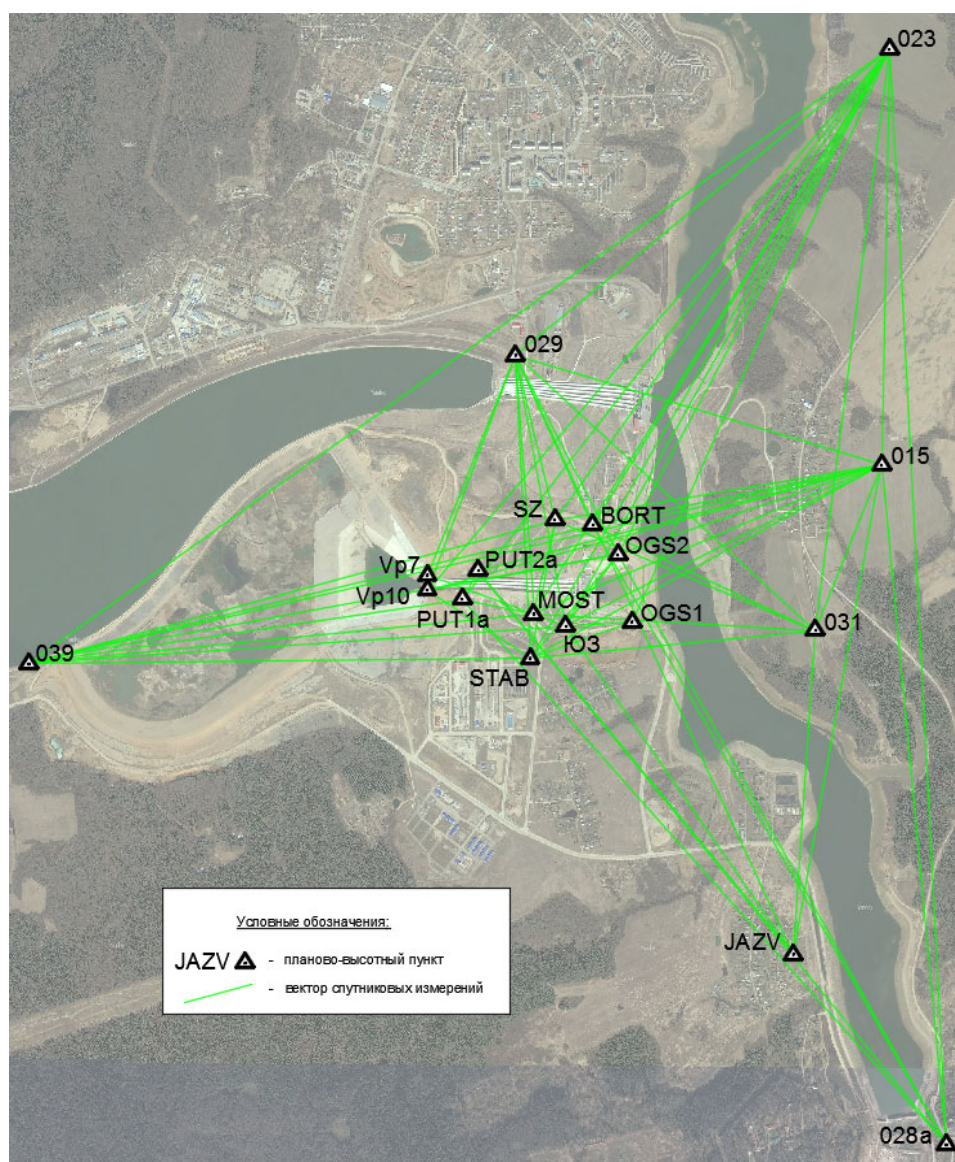


Рисунок 2.4 – Схема плановой сети Загорской ГАЭС и Загорской ГАЭС-2

Плановая опорная сеть является общей для Загорской ГАЭС и Загорской ГАЭС-2. Она включает в себя 18 пунктов, расположенных на обоих берегах реки Куньи (14 пунктов на левом берегу и 4 – на правом). Опорные пункты плановой сети являются одновременно и рабочими реперами высотного обоснования.

Плановый знак имеет конструкцию трубчатого типа, обеспечивающую долговременную сохранность. Пункт имеет систему принудительного центрирования, позволяющую выполнять центрирование инструмента с ошибкой 0,1–0,2 мм. Глубина закладки пунктов составляет не менее 3 м. Общий вид планового опорного знака приведен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Общий вид планового опорного пункта № 031

Для контроля стабильности плановой опорной сети Загорской ГАЭС-2 выполняются два цикла геодезических наблюдений в год. Наблюдения за пунктами плановой сети производятся весной и осенью.

Координаты пунктов опорной сети определяются с помощью ГНСС технологий и линейно-угловыми измерениями по программе создания плановой опорной сети 4-го класса. Основная технология измерений в сети – спутниковая.

Наблюдения выполняются в режиме статики с постобработкой по двум частотам. Длительность наблюдений на каждом пункте должна составлять от 2 до 8 часов в зависимости от значения PDOP и длины определяемых векторов. Дискретность записи наблюдений составляет 15 секунд. Маска по высоте принимается равной 10° . Синхронизация наблюдений выполняется с помощью радиосвязи. Во время работы следует вести полевой журнал, где необходимо записывать номера приемников, начало и конец сеансов наблюдений, высоты инструментов, способы их установки и условия наблюдений. Измерения выполняются двухчастотными двухсистемными ГНСС-приемниками, которые должны обеспечивать плановую погрешность не хуже $3 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D$, где D – расстояние между двумя ГНСС приемниками (в километрах).

Линейно-угловые построения выполняются на пяти плановых пунктах для получения координат пунктов по принципиально другой технологии и сравнительной оценки спутниковой и линейно-угловой методик. В линейно-угловой сети измеряются все углы и все линии. Углы измеряются способом круговых приемов шестью приемами. Линии измеряются при каждом наведении на отражатель. В процессе измерений в линии вводятся поправки за метеоусловия. При линейно-угловых измерениях должен быть использован электронный тахеометр со средней квадратической погрешностью измерения направления не хуже $1''$, расстояния – не грубее $2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D$, где D – расстояние в километрах.

Схема линейно-угловой сети представлена на рисунке 2.6.

Обработка спутниковых наблюдений выполняется по следующей схеме [11]:

- предобработка сырых данных, построение векторов;
- анализ качества измерений, исключение ненадежных векторов из обработки;
- уравнивание спутниковой сети, как свободной, в координатной системе отчета WGS-84;
- уравнивание спутниковой сети, с фиксированием координат наиболее стабильных пунктов.

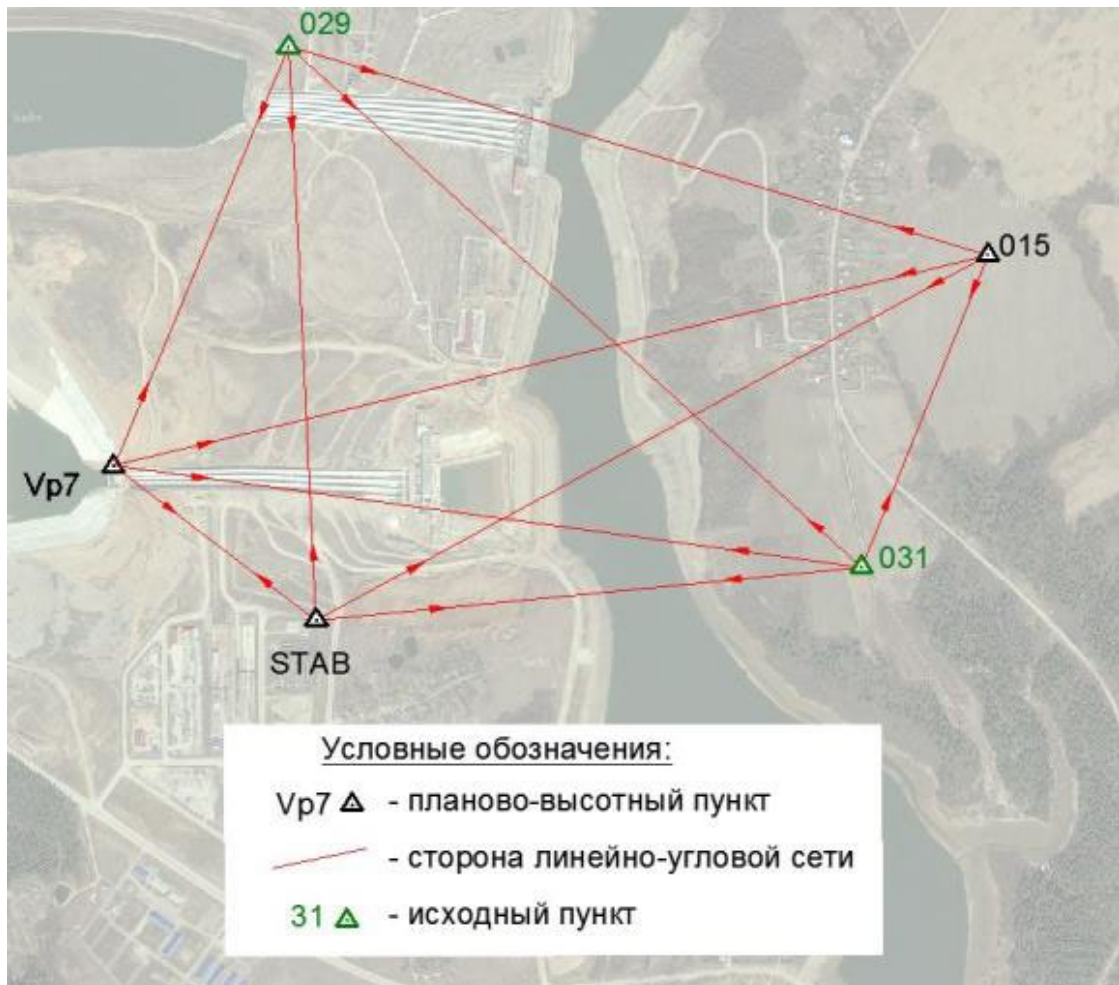


Рисунок 2.6 – Схема линейно-угловой сети Загорской ГАЭС-2

Обработка спутниковых наблюдений выполняется в специализированной программе обработки ГНСС-измерений. Предпочтительно использование программы производителя приемников, используемых на объекте, так как каждый производитель использует свой формат записи данных. Предобработка сырых данных заключается в экспорте файлов наблюдений из памяти приемников в программу, занесении данных из полевого журнала, предварительном вычислении векторов и ручной чистке малых по продолжительности фрагментов записей сигналов. После анализа качества измерений из обработки исключаются ненадежные векторы.

Уравнивание выполненных спутниковых измерений следует проводить относительно удаленных пунктов плановой опорной сети ГАЭС (например, относительно пунктов, расположенных на правом берегу реки Куньи – 015, 023, 031, а также пункта 029, находящихся на удалении от основных сооружений строящейся ГАЭС-2).

В процессе уравнивания спутниковых измерений получают координаты пунктов плановой опорной сети. По результатам уравнивания составляются ведомости оценки точности спутниковых измерений и уравнивания спутниковой сети.

Обработка линейно-угловых построений производится в специализированной программе, производящей уравнивание по способу наименьших квадратов. По результатам уравнивания составляются ведомости оценки точности сети и положения пунктов.

Вычисления ведутся в местной системе координат, принятой на строительстве Загорской ГАЭС-2. После получения окончательных результатов уравнивания следует выявить наличие или отсутствие плановых подвижек пунктов за весь период наблюдений. В случае выявления подвижек сместившийся пункт получает новые координаты.

Опорная высотная сеть является общей для Загорской ГАЭС и Загорской ГАЭС-2. В настоящее время сеть состоит из 70 опорных пунктов высотной сети (один на правом берегу – стенной репер Церковь, остальные – на левом берегу реки Куньи).

Общий вид и центр фундаментального репера показан на рисунках 2.7, 2.8.



Рисунок 2.7 – Общий вид фундаментального репера
высотной опорной сети Загорской ГАЭС-2



Рисунок 2.8 – Центр фундаментального репера
высотной опорной сети Загорской ГАЭС-2

На рисунке 2.9 показана схема опорной высотной сети.

Для контроля стабильности высотной опорной сети Загорской ГАЭС-2 выполняется геометрическое нивелирование I и II классов по рабочим, фундаментальным и стенным реперам, а также по пунктам планово-высотного обоснования. Наблюдения за пунктами высотной сети производятся дважды в течение года, весной и осенью.

Наблюдения за пунктами высотной сети на Загорской ГАЭС-2 следует выполнять методом нивелирования по программе I класса для пунктов в районе основных сооружений и нивелирования II класса для остальных пунктов. Ход геометрического нивелирования по программе I класса прокладывается по предварительно разбитой трассе в прямом и в обратном направлениях при двух горизонтах. Ход нивелирования II класса прокладывается в двух направлениях при одном горизонте нивелира [10].



Рисунок 2.9 – Схема ходов нивелирования I и II классов Загорской ГАЭС-2

Камеральная обработка результатов геометрического нивелирования I и II классов включает следующие этапы:

- первичная обработка полевых измерений (расчет невязок по полигонам/ходам);
- составление схемы нивелирных ходов;
- составление ведомости превышений;
- оценка точности полевых измерений;
- уравнивание результатов полевых измерений;
- вычисление высот реперов;
- составление каталога высот реперов.

Уравнивание системы ходов геометрического нивелирования I и II классов выполняется программными средствами параметрическим способом по методу наименьших квадратов. Первоначально сеть уравнивается, как свободная. Далее необходимо выполнить анализ устойчивости реперов по результатам повторных измерений, стремясь путем введения соответствующих поправок ослабить влияние движения реперов на результаты нивелирования. Для получения наиболее надежного и наглядного материала для анализа движения реперов высотной опорной сети рекомендуется использовать анализ устойчивости, основанный на принципе неизменности во всех циклах средней отметки сети.

По результатам уравнивания составляются ведомости высот реперов, а на основании ведомости высот – ведомости и графики осадок реперов, в которых зафиксированы изменения высот реперов с момента выполнения предыдущего цикла (текущая) и деформации за период с начала наблюдений (суммарная).

Методика проведения наблюдений за осадками. Наблюдения за осадками сооружений проводятся путем периодического геометрического нивелирования высотных марок, расположенных на сооружениях, от исходной высотной геодезической сети, расположенной за пределами сооружений, в соответствии с инструкцией по нивелированию.

Для определения осадок бетонных гидротехнических сооружений и их оснований от кустов исходных реперов прокладывают нивелирные ходы II класса, ко-

торые образуют единую нивелирную сеть, опирающуюся на опорные (рабочие) реперы сети. Для определения осадок перемычки реверсивного канала прокладывают нивелирные ходы III класса в одном направлении, при этом нивелирный ход должен быть замкнутым.

Методика проведения наблюдений по обратным отвесам. Измерения по обратным отвесам выполняются с помощью переносного координатомера. На координатный столик устанавливают координатомер и проводят замеры координат положения струны. Аналогичные измерения выполняют в перпендикулярном направлении.

При проведении измерений определяют компоненты перемещения. Вектор измеряемого перемещения при этом раскладывается на компоненты X и Y , соответствующие осям координатного столика.

Методика проведения наблюдений по щелемерам. Наблюдения по щелемерам выполняют с помощью штангенциркуля. При проведении наблюдений измеряются две компоненты смещений смежных секций друг относительно друга: вдоль и поперек плоскости шва.

Результаты всех выполненных наблюдений заносятся в соответствующие журналы наблюдений и в электронную базу данных информационно-диагностической системы БИНГ.

Периодичность проведения наблюдений по КИА представлена в таблице 2.5.

Настоящая периодичность предусматривает количество циклов наблюдений (измерений), предусмотренных на период проведения работ по стабилизации и восстановлению здания ГАЭС-2.

2.2.2 Анализ результатов натурных наблюдений за показателями состояния сооружений станционного узла Загорской ГАЭС-2 в период подготовки станции к подъему здания

В соответствии с «Программой восстановления и ввода в эксплуатацию Загорской ГАЭС-2» [41], выпущенной АО «Институт Гидропроект» в октябре 2013 г., восстановление Загорской ГАЭС-2 состоит из двух этапов: этапа стабилизации и этапа восстановления сооружений станционного узла.

Этап стабилизации Загорской ГАЭС-2 включает:

- работы по заполнению открытых и закрытых полостей под зданием ГАЭС и сопрягающими сооружениями;
- работы по укреплению грунтов основания;
- работы по обеспечению сохранности сооружений и ранее выполненных строительно-монтажных работ;
- работы по сохранению основного и вспомогательного технологического оборудования;
- работы по сохранению разрушенных и аварийных конструктивных элементов и сооружений;
- работы по укреплению конструктивных элементов и сооружений; работы по герметизации здания ГАЭС;
- работы по удалению наносов.

Кроме того, на этапе стабилизации выполнялся анализ вертикальных перемещений здания станционного узла Загорской ГАЭС-2. Для этой цели выполнялись наблюдения за осадками сооружения по программе нивелирования II класса. На рисунке 2.10 показаны результаты наблюдений за осадками по маркам, установленным со стороны нижнего бьефа (НБ) на отм. 166,40 м, в период с 09.2013 по 09.2015 на этапе стабилизации.

Оценка стабилизации здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 проводилась по наблюдениям за осадками сооружения с применением критерия Фишера для проверки значимости регрессионной модели [34]. Для оценки стабилизации был взят ряд наблюдений за осадками по характерной марке ЗМБ.26. Отметки марки ЗМБ.26, полученные по результатам нивелирования II класса, приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Периодичность проведения наблюдений по КИА, установленной на сооружениях Загорской ГАЭС-2

Вид наблюдений	Наименование КИА	СПК	ВМП	МП	Здание ГАЭС	Подпорные стены ПС- 3, ПС-4, ПС-5, ПС- 9, ПС-10	Подпорные стены ПВ, ЛВ	Под- порная стена ПС-8	Откосы и прилегаю- щая тер- ритория	Площадка размеще- ния КРУЭ	Перемычка
Визуальные наблюдения	-	1 р/сутки	1 р/сутки	1 р/сутки	1 р/сутки	1 р/сутки	1 р/сутки	1 р/сутки	1 р/сутки	1 р/сутки	1 р/сутки
Наблюдения за раскрытием тре- щин	Щелемер одноосный	-	-	-	1 р/не- делю	1 р/неделю	-	-	-	-	-
	Преобразователь линейных перемещений струнный	-	-	-	3 р/не- делю	-	-	-	-	-	-
Наблюдения за температурным режимом	Преобразователь темпера- туры струнный	1 р/не- делю	-	3 р/не- делю	3 р/не- делю	1 р/неделю (ПС-3)	3 р/неделю	-	-	-	-
Наблюдения за НДС	Преобразователь линейных перемещений, деформаций и силы арматуры (струн- ный)	1 р/не- делю	-	3 р/не- делю	3 р/не- делю	3 р/неделю	3 р/неделю	-	-	-	-
Наблюдения за фильтрационным режимом	Преобразователь давления струнный	1 р/не- делю	-	-	3 р/не- делю	-	1 р/неделю	-	-	-	1 р/сутки (при тах уровне в НАБ)
	Пьезометр закладной напор- ный, боковой	1 р/не- делю	-	-	3 р/не- делю	-	-	-	-	-	-
	Пьезометр опускной	-	-	-	-	-	-	-	1 р/не- делю	1 р/не- делю	1 р/сутки (при тах уровне в НАБ)
Наблюдения за вертикальными перемещениями	Марка поверхностная грун- товая, марка бетонная, марка стеновая, труба- марка, планово-высотный знак	1 р/ме- сяц	3 р/не- делю	3 р/не- делю	3 р/не- делю	3 р/неделю	1 р/неделю	3 р/ме- сяц	1 р/месяц	-	2 р/месяц
Наблюдения за горизонтальными перемещениями	Светодалномерный знак, марка бетонная, метка отра- жающая пленка	-	1 р/ме- сяц	1 р/ме- сяц	1 р/месяц	1 р/месяц	-	3 р/ме- сяц	1 р/месяц	-	1 р/месяц
Наблюдения за относительными перемещениями (смещениями)	Щелемер трехмарочный	-	-	-	-	-	1 р/неделю	-	-	-	-

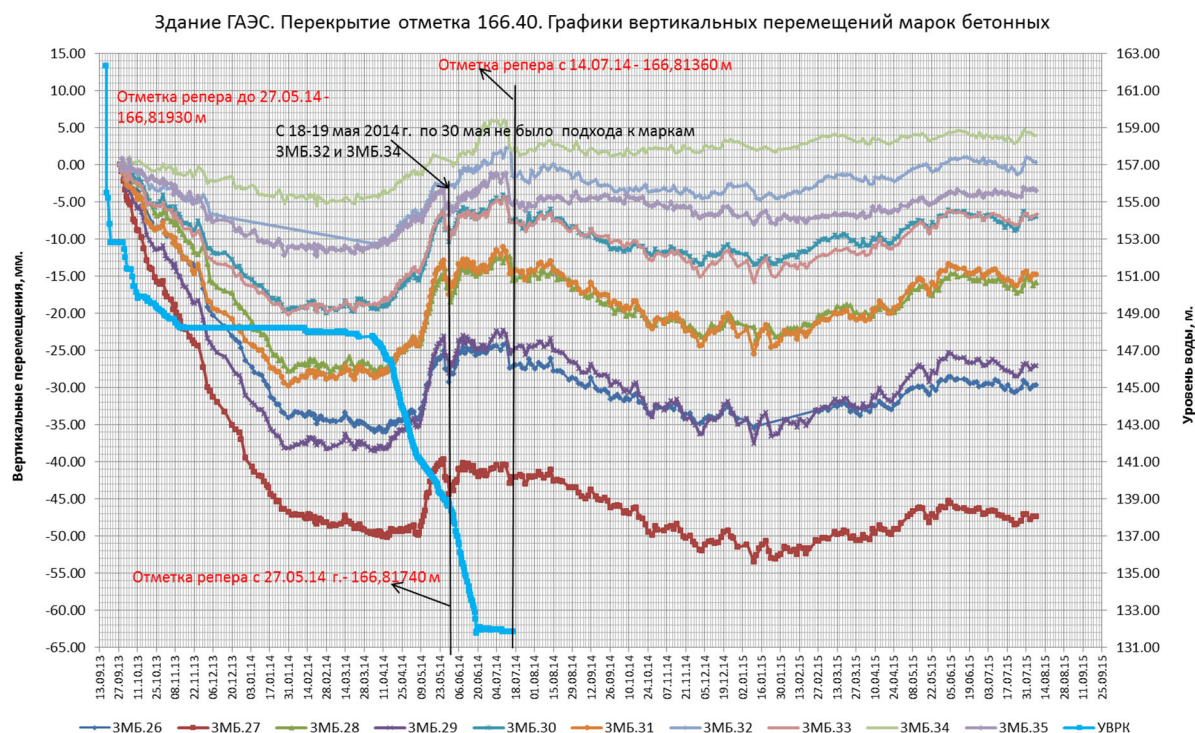


Таблица 2.6 – Отметки марки ЗМБ.26, полученные по результатам нивелирования II класса

Дата	ЗМБ.26	Дата	ЗМБ.26
	абс. отм., м		абс. отм., м
01.07.2015	165,14607	14.08.2015	165,14649
03.07.2015	165,14610	17.08.2015	165,14542
06.07.2015	165,14592	19.08.2015	165,14542
08.07.2015	165,14661	21.08.2015	165,14547
10.07.2015	165,14640	24.08.2015	165,14589
13.07.2015	165,14566	26.08.2015	165,14536
15.07.2015	165,14524	28.08.2015	165,14562
17.07.2015	165,14584	31.08.2015	165,14540
20.07.2015	165,14508	02.09.2015	165,14568
22.07.2015	165,14486	04.09.2015	165,14548
24.07.2015	165,14503	07.09.2015	165,14526
27.07.2015	165,14550	09.09.2015	165,14504
29.07.2015	165,14643	11.09.2015	165,14487
31.07.2015	165,14609	14.09.2015	165,14533
03.08.2015	165,14541	16.09.2015	165,14508
05.08.2015	165,14576	18.09.2015	165,14558
07.08.2015	165,14585	21.09.2015	165,14599
10.08.2015	165,14635	23.09.2015	165,14619
12.08.2015	165,14651	25.09.2015	165,14593

Уравнение регрессии осадок марки ЗМБ.26 может быть описано с помощью квадратической функции:

$$y = a \cdot t^2 + b \cdot t + c, \quad (2.1)$$

где t – дата наблюдений.

Уравнение регрессии определяется с помощью известного метода МНК-оптимизации данных. На рисунке 2.11 показан график распределения осадок марки ЗМБ.26 и вычисленное уравнение регрессии этой марки.

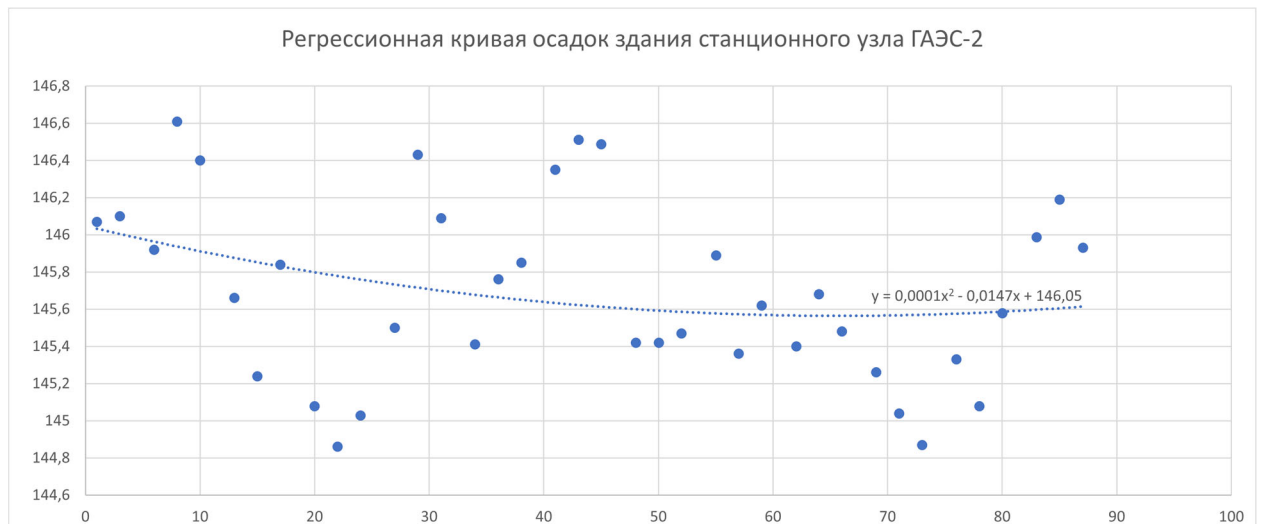


Рисунок 2.11 – График распределения осадок марки ЗМБ.26
и уравнение регрессии этой марки

Оценку значимости уравнения регрессии произведем с помощью критерия Фишера. Проверяем «нулевую гипотезу», когда коэффициенты регрессии равны 0 и соответственно фактор времени t не оказывает влияния на признак y , что в данном случае означает отсутствие значимых осадок марки. «Нулевая гипотеза» отвергается, если

$$F > F_{\text{табл}}. \quad (2.2)$$

«Нулевая гипотеза» принимается, если

$$F < F_{\text{табл}}. \quad (2.3)$$

Критерий Фишера получим из следующего выражения:

$$F = \frac{\sigma_{\text{факт}}^2}{\sigma_{\text{ост}}^2}, \quad (2.4)$$

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

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

Факторная и остаточная дисперсии могут быть вычислены как

$$\sigma_{\text{факт}}^2 = \frac{\sum (y_t - \bar{y})^2}{k - 1}, \quad (2.5)$$

$$\sigma_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y_i - y_t)^2}{n - k}, \quad (2.6)$$

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 учетом этого критерий Фишера, вычис-

ленный по формуле (2.4), 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. Уравнение регрессии признается статистически незначимым. Отсюда следует вывод, что осадка здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 стабилизировалась.

2.3 Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2.

Обоснование необходимости разработки методики комплексного мониторинга Загорской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания

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 [43]. Осуществление подобного подъема не имеет аналогов как в отечественном, так и зарубежном гидротехническом строительстве. В результате анализа вариантов восстановления к дальнейшей разработке проектным институтом АО «Институт Гидропроект» рекомендуется метод подъема здания ГАЭС нагнетанием под высоким давлением в грунт основания вмещающего материала с образованием разрывов в грунте, создающих дополнительный объем в условиях заполненного водой котлована здания ГАЭС. При этом допускается, что в результате проведения восстановительных работ отметка сооружений может несколько отличаться от проектной.

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.

Сущность метода компенсационного нагнетания заключается в инъекции в предварительно подготовленную структуру грунта, расположенную в основании здания, избыточного объема медленно твердеющего раствора на минеральной ос-

нове, имеющего заданную вязкость и обладающего способностью к тиксотропному разжижению [14]. Это позволяет сформировать расчетное напряженно-деформируемое состояние массива грунта, обеспечивающее управляемый подъем надземного сооружения, используя эффект гидродомкрата, размещенного под всей его площадью.

При выравнивании здания в нем возникают внутренние усилия, поэтому порядок выполнения работ по подъему осуществляется в определенной последовательности, обеспечивающей не превышение внутренних усилий в сооружении над допустимыми. При выполнении работ подъем сооружения делится на ступени с оценкой НДС на каждом этапе. Расчетные показания при подъеме сравниваются с результатами наблюдений и, при необходимости, выполняется корректировка процедуры подъема.

Каждый этап подъема сопровождается некоторой обратной осадкой сооружения (релаксацией грунта), которая происходит в течение определенного периода. Поэтому график выполнения работ составляется таким образом, чтобы можно было определить эту осадку и выполнить работы по корректировке положения сооружения.

В рамках работ по проектированию подъема здания ГАЭС была разработана пространственная геотехническая конечно-элементная модели системы «здание ГАЭС – основание». Модель предназначена для расчетного прогнозирования изменения высотного положения здания ГАЭС в результате управляемого компенсационного нагнетания.

Моделирование процесса выравнивания здания ГАЭС методом компенсационного нагнетания выполняется методом конечных элементов (МКЭ) в соответствии с методологией, принятой в проекте. Для учета действительной нелинейной работы грунта применяется модель упрочняющегося грунта Hardening Soil (HS). Для учета возможности сдвигов и открытия (отлипания) по контакту «бетон-грунт» и закрытия по контакту «бетон-бетон» (в местах совершенных деформационных швов между сооружениями напорного фронта) применяются контактные конечные

элементы. МКЭ-моделирование выполняется в современных программно-вычислительных комплексах: геотехническом Z_Soil и конструкторском ЛИРА 10.

Моделирование компенсационного нагнетания выполнялось в несколько этапов.

1-й этап – вычисление природных напряжений грунтового массива до и после строительства сооружений гидроузла Загорской ГАЭС-2.

2-й этап – моделирование развития непроектных осадок. По результатам подводных исследований, геодезической и батиметрической съемок ковшевой части понура нижнего бьефа был задан объем грунта эрозионного канала в основании здания, которому присваиваются изменяемые в пять этапов деформационные характеристики, в части уменьшения модуля деформации до тех значений, когда планово-высотное положение здания ГАЭС станет соответствовать фактическим значениями на момент завершения стабилизации. Расчетные значения вертикальных перемещений были подобраны под фактические посредством серии предварительных расчетов.

3-й этап – поэтапное моделирование компенсационного нагнетания в основании здания Загорской ГАЭС-2, начиная с нижних зон. Было выполнено распределение проектных объемов инъекционного раствора для осуществления подъема здания ГАЭС, составляющее порядка 17,1 тыс. м³, которое в наибольшей степени отвечает критериям сохранности здания и эффективности компенсационного нагнетания. Последовательное нагнетание моделируется заданием начальных деформаций в зоне нагнетания до восстановления исходного планово-высотного положения здания.

Результаты калибровки пространственной модели представлены на рисунках 2.12–2.14. Начальное состояние модели соответствует положению здания ГАЭС до инцидента 17.09.2013. Далее модель за 210 шагов воспроизводит процесс образования эрозионного канала, просадки и затопления здания ГАЭС, осушения здания ГАЭС и выравнивания здания методом компенсационного нагнетания.

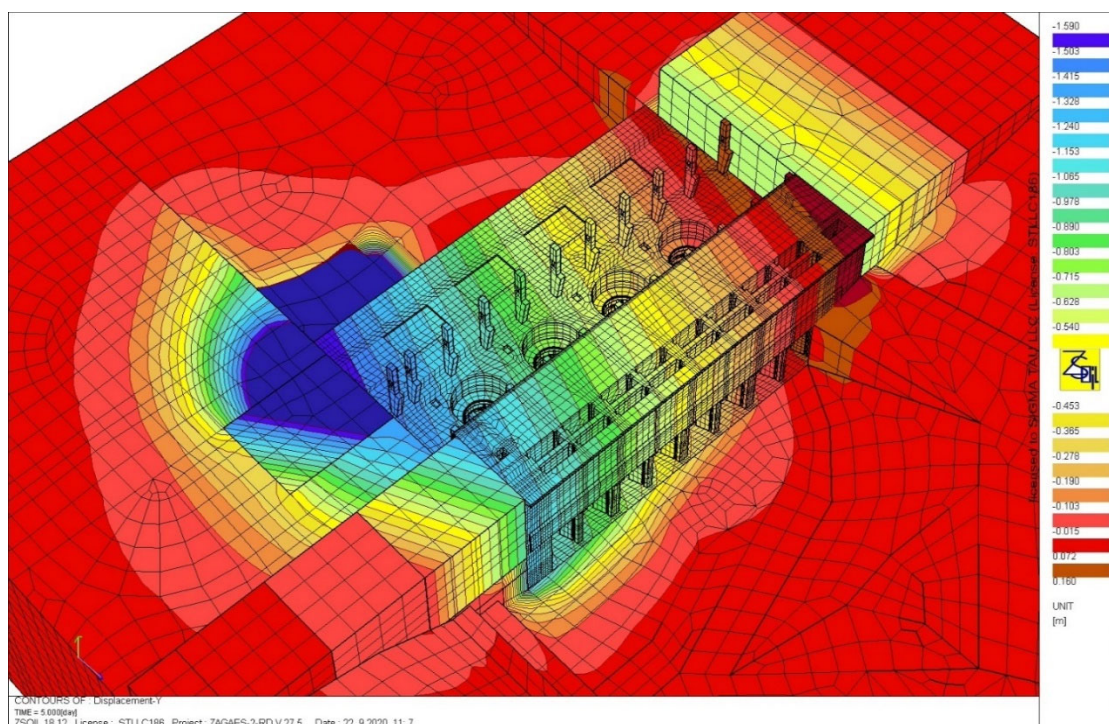


Рисунок 2.12 – Пространственная система «здание ГАЭС – основание». Этап 5. Стабилизированное положение здания ГАЭС. Вертикальное отклонение здания от проектного положения от +0,2 до -1,6 м

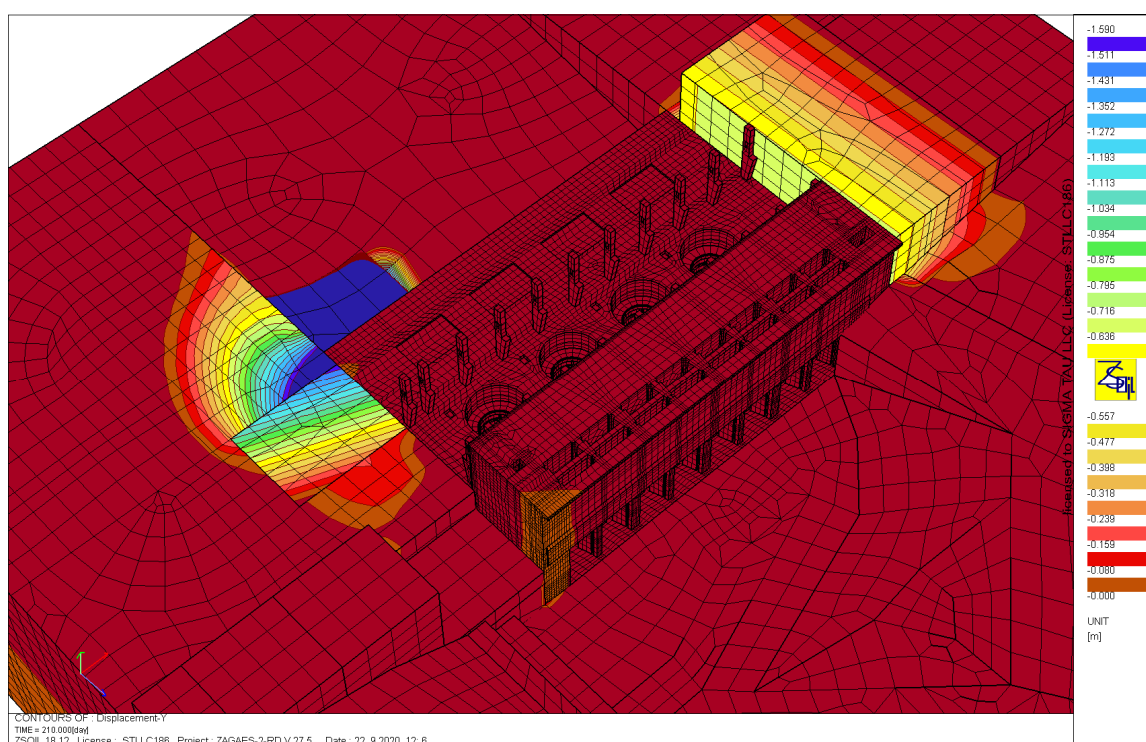


Рисунок 2.13 – Пространственная система «здание ГАЭС – основание». Этап 210. Завершение выравнивания. Здание в проектном высотном положении

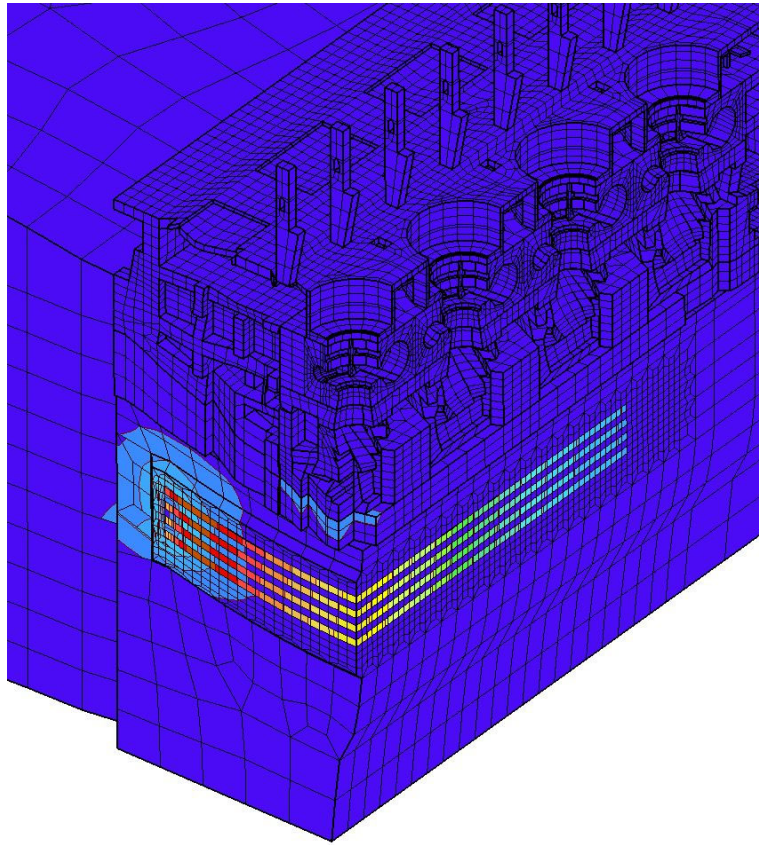


Рисунок 2.14 – Пространственная система «здание ГАЭС – основание».
Этап 210. Вертикальные относительные деформации

Таким образом, для оперативного контроля процесса выравнивания здания методом компенсационного нагнетания необходимо создать автоматизированную систему непрерывного мониторинга пространственного положения ГТС стационарного узла Загорской ГАЭС-2, позволяющую:

- получать фактические значения количественных контролируемых показателей, с помощью которых выполняется оперативная оценка состояния сооружения, выявлять отклонения в работе сооружения от проектных представлений и от нормального эксплуатационного состояния;
- своевременно принимать меры для предотвращения повреждения сооружения и аварийных отказов в работе сооружения;
- своевременно и в оптимальном объеме выполнять ремонтные работы по восстановлению необходимого при эксплуатации уровня безопасности сооружения;
- проверять и уточнять методы расчетов сооружения и конструкций.

2.4 Результаты геодезического мониторинга подъема фундаментной плиты на опытном участке в процессе компенсационного нагнетания

В период с 01.08.2016–05.07.2017 сотрудниками ОАО «Институт Гидропроект» были выполнены опытные работы по подъему фундаментной плиты на опытном участке (ОУ) № 3. Опытный участок вблизи здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 представлял собой модель фундаментной плиты здания ГАЭС размерами в осях 10×10 м толщиной 5 м, заглубленную в грунт на глубину от 17 до 21 м, что позволило смоделировать фактическую нагрузку собственного веса здания ГАЭС на фундаментную плиту (рисунок 2.15).

Закачка инъекционного состава производилась через манжетные колонны под модель фундаментной плиты. На рисунке 2.16 показан график изменения перемещений фундаментной плиты в течение всех инъекционных работ на ОУ № 3. Максимальная величина перемещения составила 468 мм.

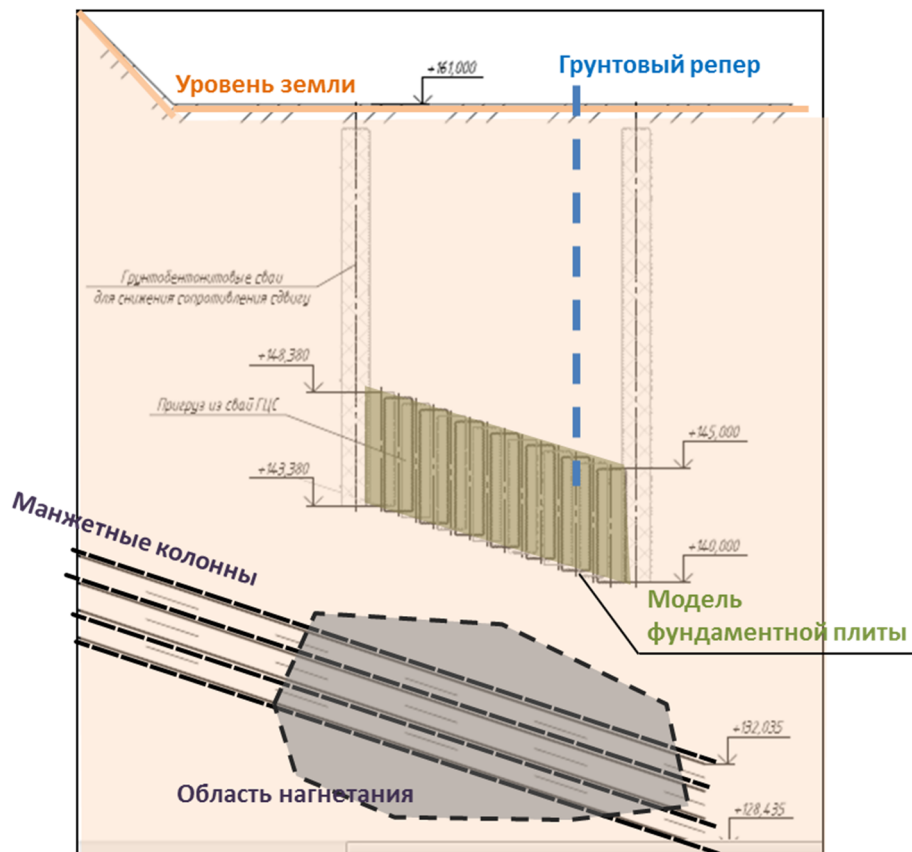


Рисунок 2.15 – Принципиальная схема опытного участка [23]

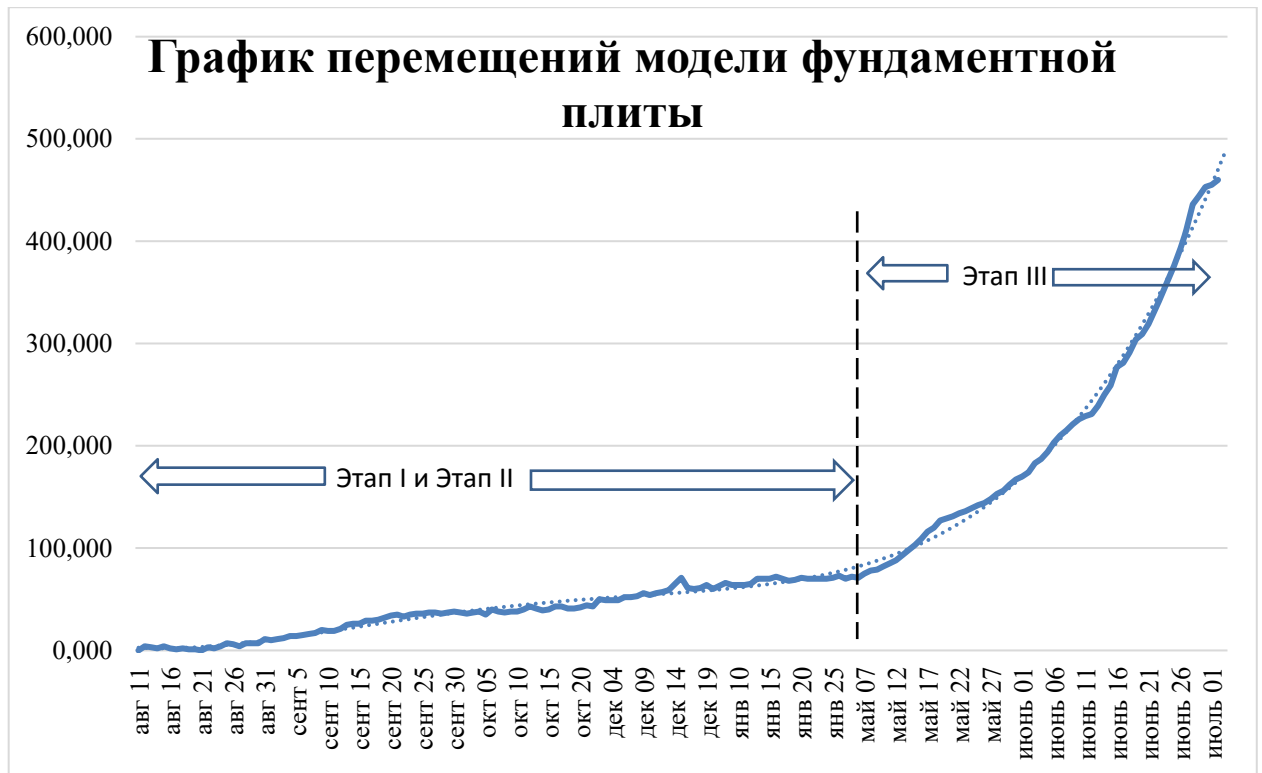


Рисунок 2.16 – График перемещений модели фундаментной плиты

Для наблюдения за перемещениями модели фундаментной плиты на ОУ была развернута сеть мониторинга, состоящая из 9 грунтовых глубинных реперов, заложенных в модель плиты, и 13 грунтовых наземных реперов, заложенных в грунт над поверхностью плиты.

Система мониторинга перемещений была создана на базе автоматизированного тахеометра Leica TM30 фирмы Leica Geosystems (Швейцария), который располагался на станции UV. Контрольными пунктами являлись пункты геодезической сети ГАЭС MOST, BORT, UZ, а также марки на подпорных стенах № 8 и № 10.

В качестве отражателей на точках мониторинга использовались самоклеящиеся рефлексорные марки Leica GZM31, предназначенные для работы с автоматизированными электронными тахеометрами с автоматическим распознаванием на расстоянии до 45 м. Отражательные марки были установлены на пластины реперов (рисунок 2.17) таким образом, чтобы обеспечить видимость на каждую точку мониторинга со станции автоматизированного тахеометра. На контрольных пунктах использовались отражатели Leica GPR121 и Leica GRZ4 (360°). Для учета влияния метеопараметров в системе мониторинга был установлен метеодатчик [54].

Расстояния от тахеометра до отражательных марок составили от 25,2 до 44,5 м. Углы наклона линии визирования от $-7^{\circ}15'$ до $-13^{\circ}28'$.

Регистрация наблюдений выполнялась с периодичностью не реже 1 раза в 15 минут в памяти автоматизированного тахеометра и на сервере, где было установлено программное обеспечение системы мониторинга Leica GeoMoS. Измерения на контрольные точки производились каждые два часа.

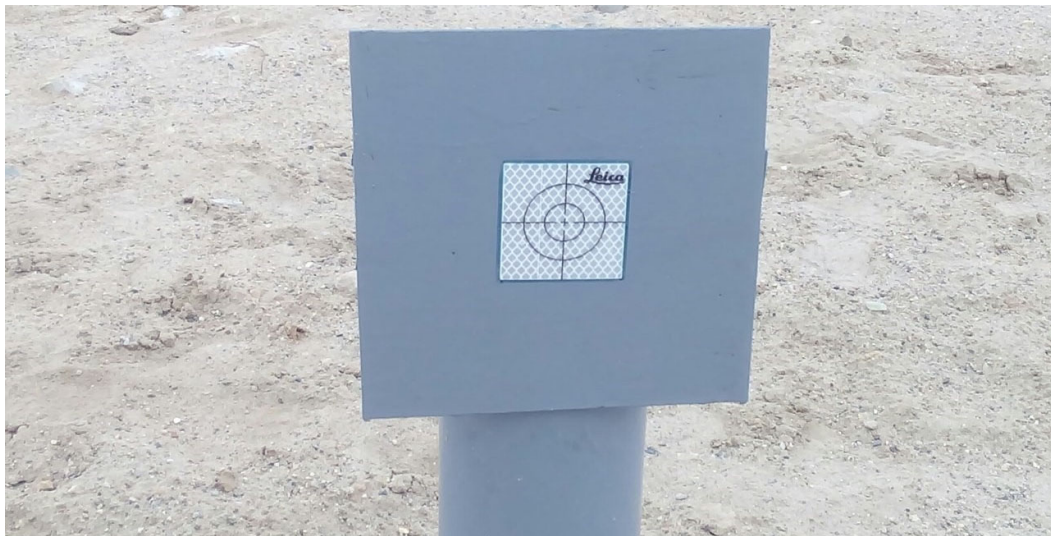


Рисунок 2.17 – Точка мониторинга с отражательной маркой

Наблюдения в системе мониторинга проводились в течение 14 месяцев. Дважды в день выдавался отчет о вертикальных перемещениях контролируемых точек. В течение суток количество измерений до каждого репера составляло до 96.

В результате был изучен характер изменения во времени превышений контрольных реперов над опорным пунктом. Для каждого из реперов получены временные ряды изменения превышений (рисунки 2.18–2.21).

Как видно из графиков вертикальных перемещений, приведенных выше, наибольший подъем, и скорость подъема были зафиксированы с начала мая по начало июля 2017 г.

Максимальный подъем наблюдался на глубинном репере № 7 и составил за весь период мониторинга 468 мм, что соответствует расчетному эффективному объему инъецированных составов под фундаментной плитой.

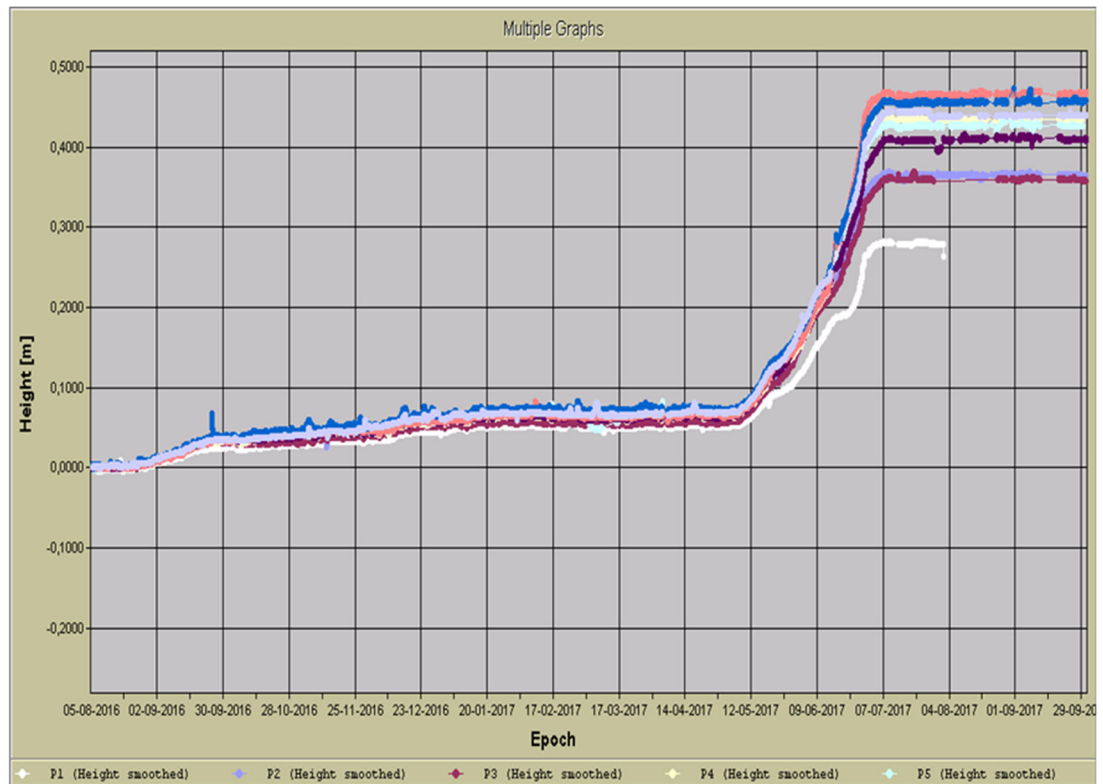


Рисунок 2.18 – График вертикальных перемещений глубинных реперов
с 05.08.2016 по 30.09.2017

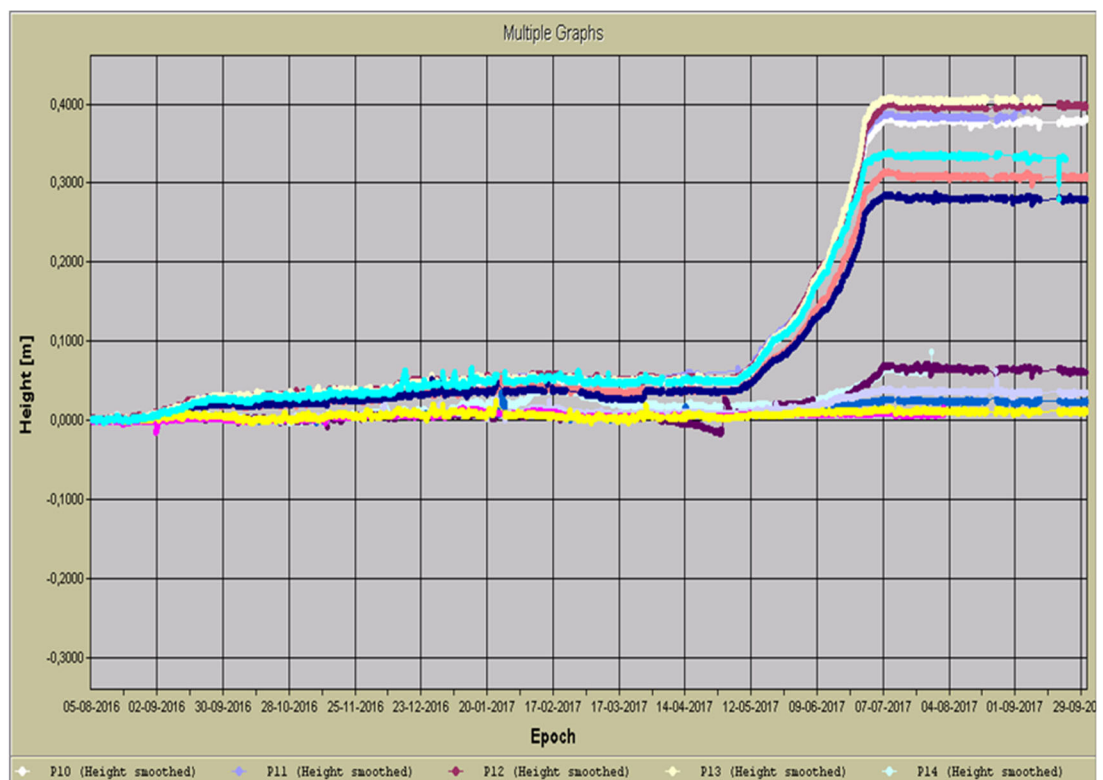


Рисунок 2.19 – График вертикальных перемещений наземных реперов
с 05.08.2016 по 30.09.2017

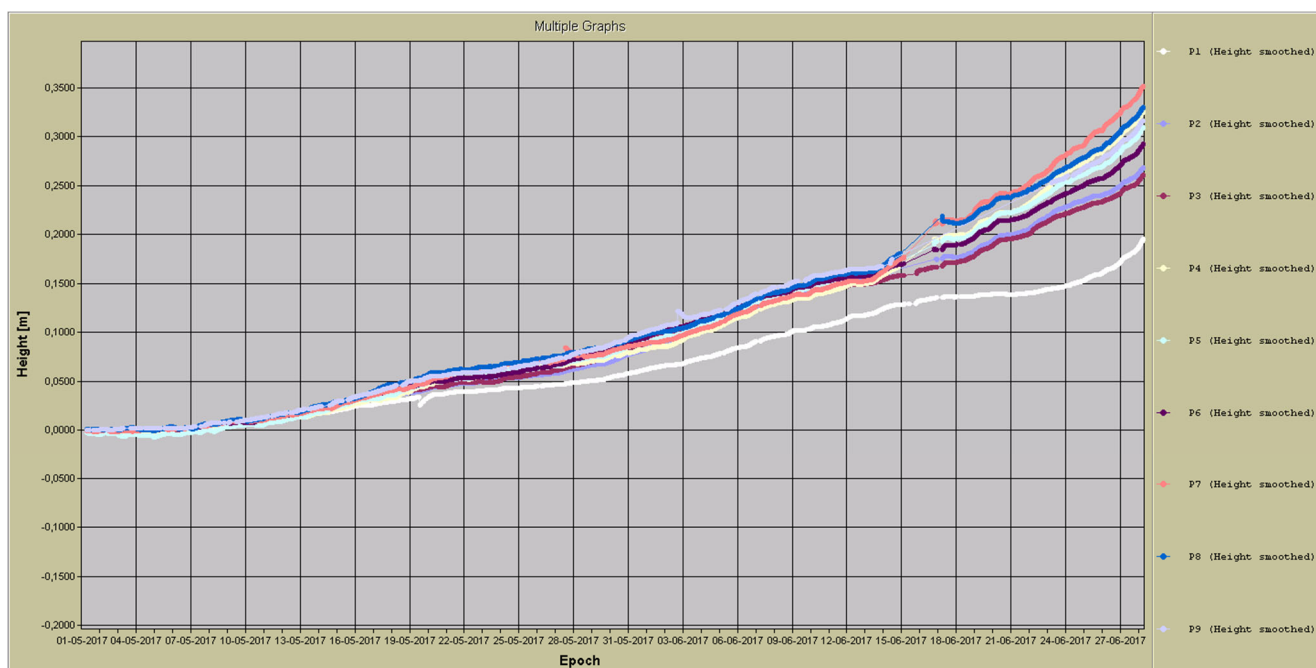


Рисунок 2.20 – График вертикальных перемещений глубинных реперов
с 01.05.2017 по 28.06.2017

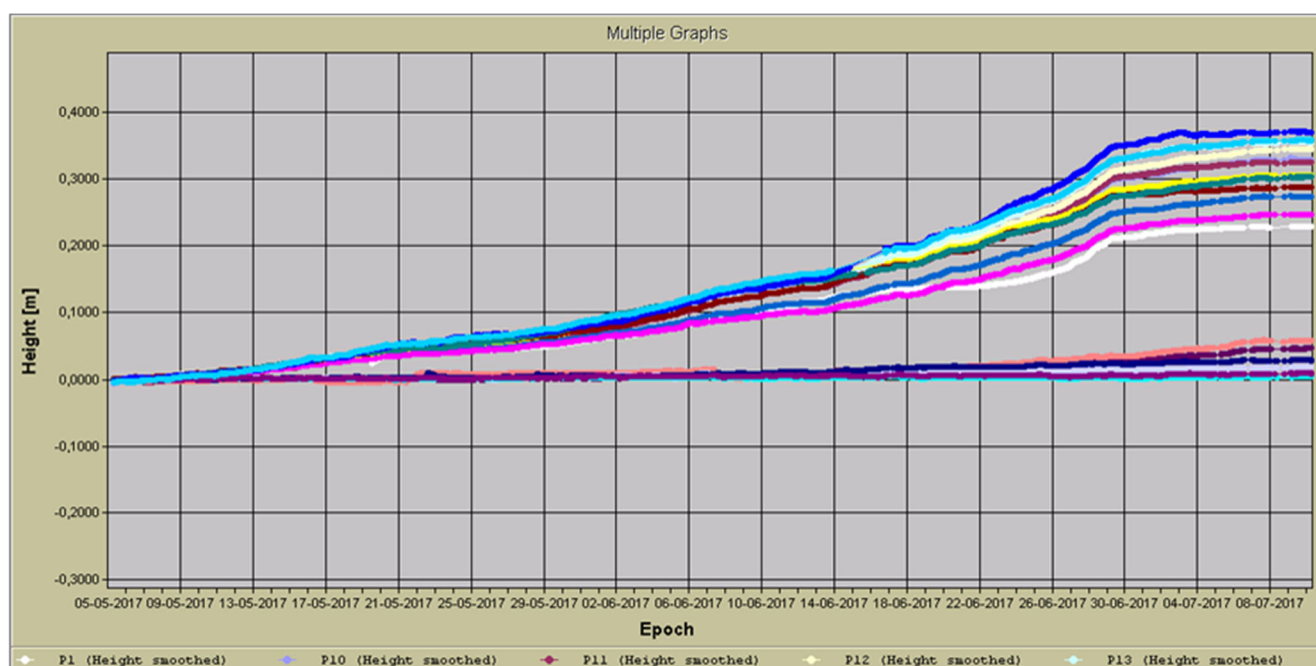


Рисунок 2.21 – График вертикальных перемещений наземных реперов
с 05.05.2017 по 10.07.2017

В течение всего периода наблюдений не реже одного раза в месяц проводился контроль результатов автоматизированной системы мониторинга перемещений методом геометрического нивелирования по программе нивелирования II класса. СКО

измерений автоматизированной системой мониторинга по отклонениям от результатов нивелирования составила $\pm 3,2$ мм [54, 56].

Для визуализации результатов геодезического мониторинга была написана программа в программной среде MATLAB. Блок-схема программного модуля приведена на рисунке 2.22. Программа читает файл с данными мониторинга, проверяет качество данных и строит поверхность в каждом цикле по полученному временному ряду. Ниже приведены трехмерные графики вертикальных перемещений грунтовых реперов (рисунки 2.23–2.25).

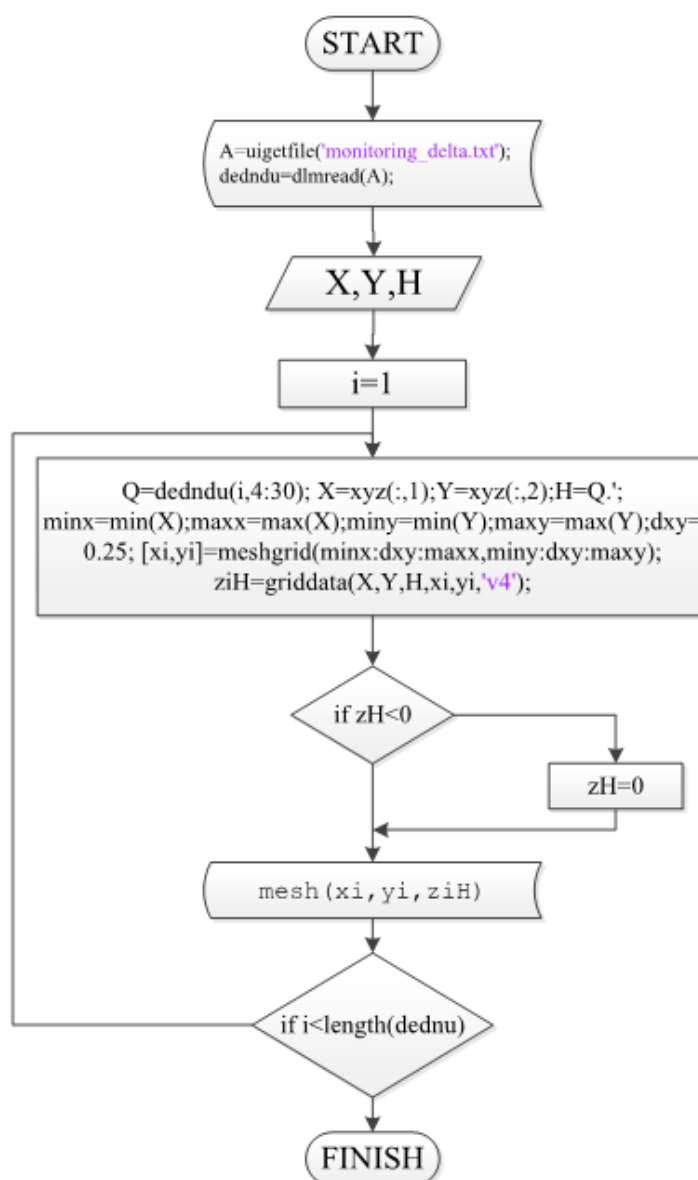


Рисунок 2.22 – Блок-схема программы визуализации результатов мониторинга на опытном участке № 3

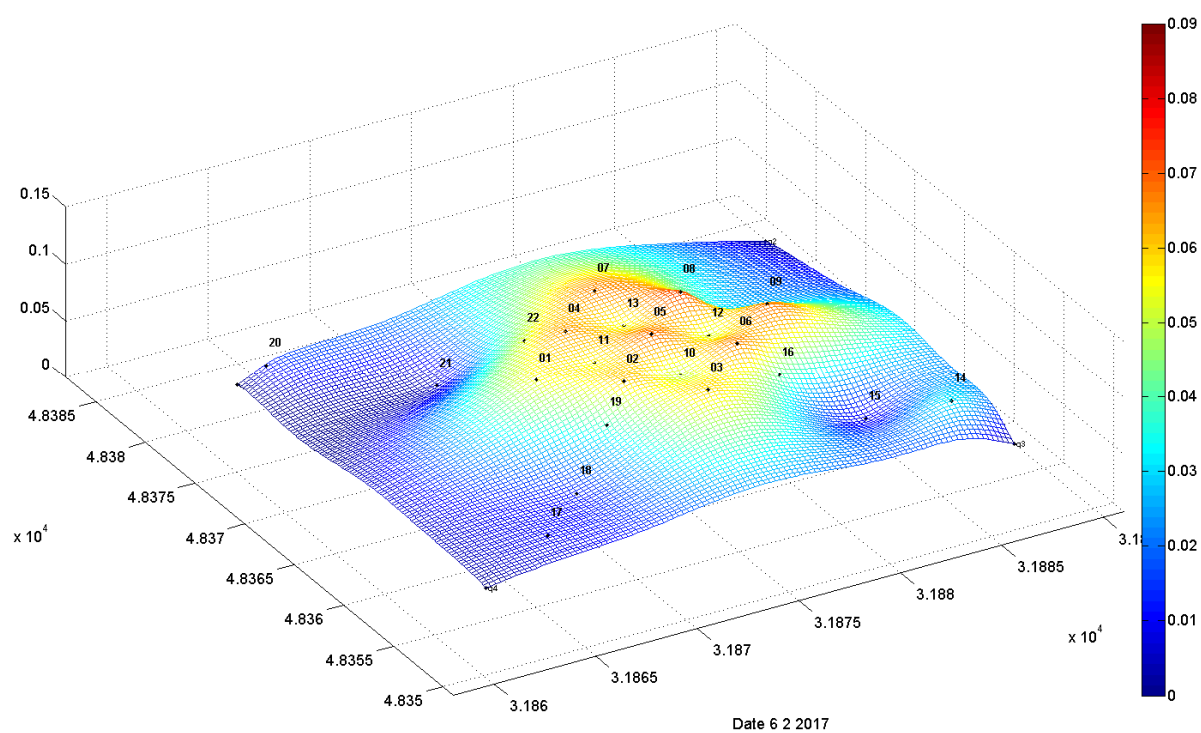


Рисунок 2.23 – Результаты мониторинга на 06.02.2017

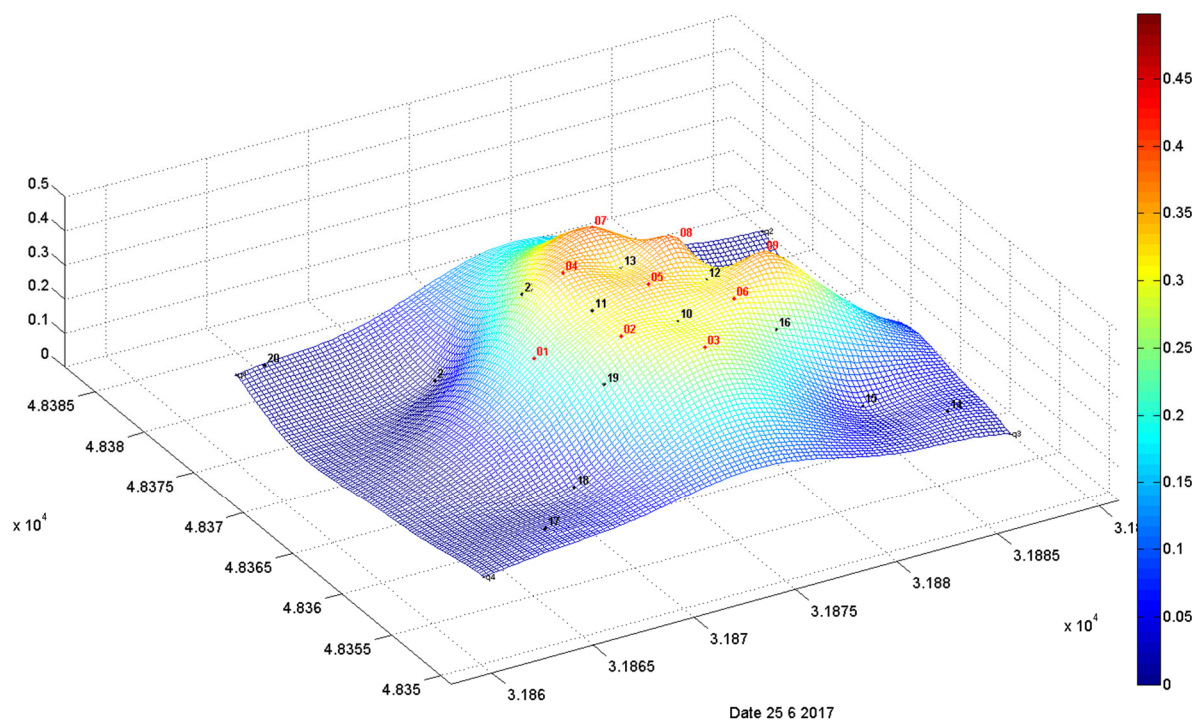


Рисунок 2.24 – Результаты мониторинга на 26.06.2017

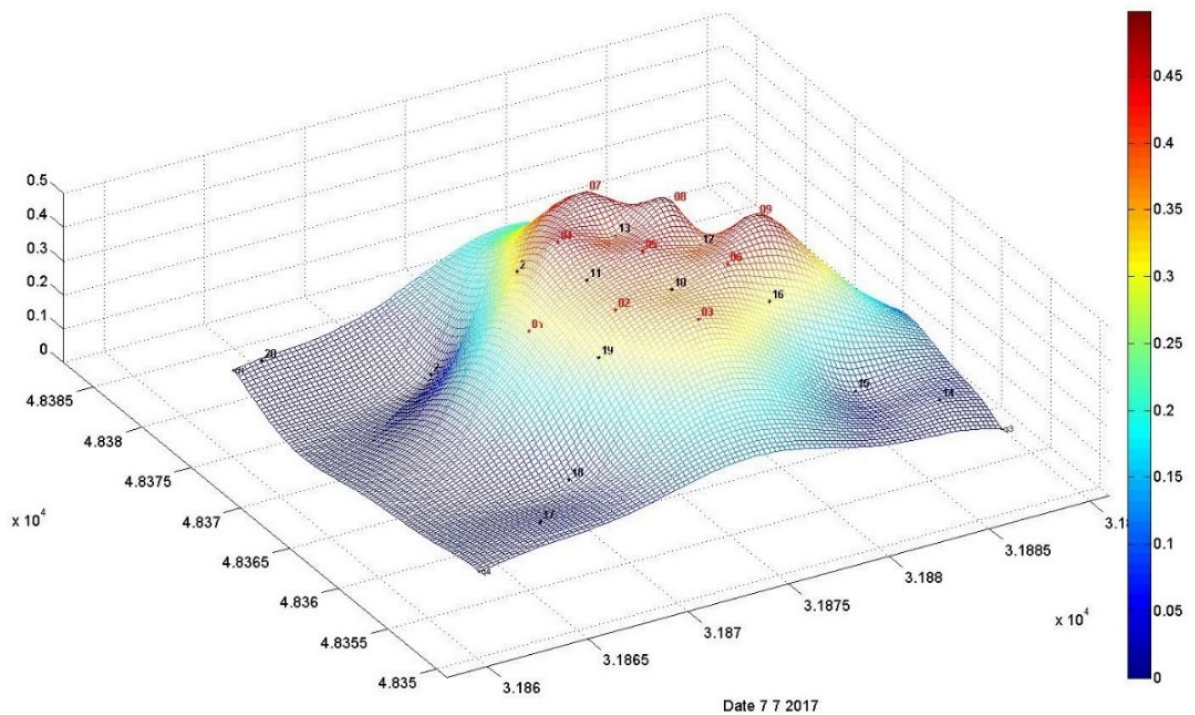


Рисунок 2.25 – Результаты мониторинга на 07.07.2017

Рисунки 2.23–2.25 демонстрируют пространственно-временные особенности процесса подъема модели фундаментной плиты и расположенных над ней объемов грунта.

На рисунке 2.26 показан общий вид ОУ № 3 после выполнения работ по подъему.



Рисунок. 2.26 – Общий вид ОУ № 3 после выполнения работ по подъему

2.5 Выводы по второму разделу

Во втором разделе приведены общие сведения о сооружениях Загорской ГАЭС-2, а также о произошедшем техническом инциденте 17.09.2013. Описаны проектные решения АО «Институт Гидропроект» по ликвидации последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания. Приведено описание существующей системы геодезического мониторинга сооружений Загорской ГАЭС-2, даны сведения об опорных плановой и высотной сетях гидроузла.

Восстановление Загорской ГАЭС-2 состоит из двух этапов: этап стабилизации и этап восстановления сооружений станционного узла. Для оценки стабилизации здания Загорской ГАЭС-2 проведен анализ ряда наблюдений за осадками характерной марки на здании с применением критерия Фишера для проверки значимости регрессионной модели.

Проект восстановления Загорской ГАЭС-2 предусматривает выполнение выравнивания здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания с подъемом правобережной части здания на величины около 1,5 м, что не имеет аналогов как в отечественном, так и зарубежном гидротехническом строительстве.

Для апробации метода компенсационного нагнетания в условиях Загорской ГАЭС-2 и разработки оптимальных составов инъекционных растворов были проведены работы по подъему фундаментной плиты на опытном участке вблизи здания ГАЭС. Результаты геодезического мониторинга подъема бетонной плиты, заглубленной в грунт на глубину от 17 до 21 м методом компенсационного нагнетания, приведены в данном разделе.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ТОЧНОГО ТОЧЕЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

3.1 Метод точного точечного позиционирования

Концепция метода точного точечного позиционирования (Precise Point Positioning – PPP) заключается в следующем [77, 96]. Метод обеспечивает получение высокоточных координат одним ГНСС-приемником при обработке статических и кинематических данных, полученных как в режиме реального времени, так и в постобработке. Для получения высокоточных координат в методе PPP необходимо использовать:

- двухчастотные (или мультимчастотные) ГНСС-измерения кодовых и фазовых псевдодальностей;
- уточненную эфемеридно-временную информацию, представленную в виде точных эфемерид и поправок к часам спутников;
- информацию о координатах полюса;
- информацию об амплитуде и фазе океанических приливов.

Точность двухчастотного метода PPP в настоящее время оценивается на уровне первых миллиметров. Такая точность достигается за счет использования следующих математических моделей кодовых и фазовых псевдодальностей:

$$P_i = \rho + c \cdot dt_r - c \cdot dt^s + \mu_i \cdot I + T + B_{r,i} - B_i^s + dm + e_{P_i} + \Sigma, \quad (3.1)$$

$$\Phi_i = \rho + c \cdot dt_r - c \cdot dt^s - \mu_i \cdot I + T + b_{r,i} - b_i^s + \lambda_i \cdot N_i + \delta m + \varepsilon_{\Phi_i} + \Sigma, \quad (3.2)$$

где i – индекс, обозначающий несущую частоту;

P_i – измеренная кодовая псевдодальность (в линейной мере);

Φ_i – измеренная фазовая псевдодальность (в линейной мере);

ρ – геометрическая дальность между фазовыми центрами антенн спутника и приемника;

c – скорость света в вакууме;

dt_r и dt^s – поправка часов приемника и спутника, соответственно;

I – ионосферная задержка для первой несущей частоты;

μ_i – коэффициент для перехода от значения ионосферной задержки на несущей частоте $L1$ к i -й несущей частоте;

T – тропосферная задержка;

λ_i – длина волны на i -й несущей частоте;

N_i – целочисленная неоднозначность на i -й несущей частоте;

$B_{r,i}$ и $B_{s,i}$ – кодовые смещения приемника и спутника;

$b_{r,i}$ и b_i^s – фазовые смещения приемника и спутника;

dm и δm – многолучевость кодовых и фазовых псевдодальностей, соответственно;

e_{P_i} и ε_{Φ_i} – шум кодовых и фазовых псевдодальностей;

Σ – другие виды поправок.

В формулах (3.1) и (3.2) коэффициент μ_i рассчитывается как

$$\mu_i = \frac{f_i^2}{f_1^2}, \quad (3.3)$$

где f_i – i -я несущая частота;

f_1 – несущая частота $L1$.

Далее для двух или трехчастотных кодовых и фазовых псевдодальностей формируется ионо-свободная линейная комбинация [96]

$$P_{IF} = \rho + c \cdot dt_r - c \cdot dt^s + T + e_{P_{IF}}, \quad (3.4)$$

$$\Phi_{IF} = \rho + c \cdot dt_r - c \cdot dt^s + T + \lambda_{IF} \cdot N_{IF} + \varepsilon_{\Phi_{IF}}. \quad (3.5)$$

В формуле (3.3) величина $e_{P_{IF}}$ вычисляется как

$$e_{P_{IF}} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot e_{P_1} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot e_{P_2}. \quad (3.6)$$

В формуле (3.4) величина $\lambda_{IF} \cdot N_{IF}$ вычисляется как

$$\lambda_{IF} \cdot N_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (\lambda_1 \cdot N_1 + b_{r,1} - b_1^s) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (\lambda_2 \cdot N_2 + b_{r,2} - b_2^s), \quad (3.7)$$

а величина $\varepsilon_{\Phi_{IF}}$ определяется как

$$e_{\Phi_{IF}} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot e_{\Phi_1} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot e_{\Phi_2}. \quad (3.8)$$

В поправки Σ входят следующие составляющие – релятивистские эффекты (Шапиро и Саньяка), эффект взаимного вращения антенн и вариации положения фазовых центров антенн спутника и приемника.

Эффект Шапиро (иначе радарный эффект) вызван распространением сигнала от спутника к приемнику в гравитационном поле Земли, имеет величину до 2 см и оценивается по векторам положения спутника и приемника [77].

Эффект Саньяка вызван вращением геоцентрической системы координат (вращением Земли) за период распространения сигнала от спутника к приемнику. Его величина зависит от времени распространения [77].

Вариации положения фазового центра передающей антенны спутника оцениваются по надирным углам, под которыми со спутника наблюдается приемник. Эта поправка зависит от частоты и составляет несколько миллиметров. Параметры для ее учета публикуются в файле формата ANTEX [75].

Вариации положения фазового центра антенны приемника оцениваются по зенитным углам каждого спутника. Эта поправка также частотно зависима и составляет обычно несколько миллиметров. Конкретное значение поправки зависит от типа антенны и устанавливается в процессе калибровки. Перечень калиброванных антенн с необходимыми параметрами доступен в файле ANTEX [75].

Эффект взаимного вращения антенн спутника и приемника (wind-up) вызван как движением спутника по орбите, так вращением спутника на орбите. Этот эффект может давать прибавку к фазовому измерению от 0 до 2π [81].

Кроме указанных поправок, вносимых непосредственно в уравнения измерений, есть поправки, которые вводятся в оцениваемые координаты станции. Дело в том, что концепция PPP предполагает нахождение координат на эпоху наблюдений в геоцентрической системе координат, установленной согласно договоренностям Международной службы вращения Земли (IERS) [79]. Это, в свою очередь требует моделирования приливных эффектов, изменяющих положения земной коры, – твердых приливов, океанических приливов и приливов, вызывающих смещение положения полюса.

Твердые приливы моделируются с помощью эфемерид Солнца и Луны и коэффициентов упругости Лява [77, 79, 82]. Этот эффект достаточно существенный, в высотном направлении достигает 17 см.

Эффект океанических приливов оценивается с помощью астрономических аргументов для 11 основных приливов, которые в свою очередь также вычисляются через эфемериды Солнца и Луны. Ключевыми параметрами являются амплитуда и фаза каждого из 11 приливов, которые устанавливаются эмпирически и представляются на регулярной глобальной градусной сетке в виде соответствующих моделей. Для конкретной станции можно получить амплитуды и фазы приливов в фор-

мате файла BLQ [65, 90]. Величина эффекта уменьшается по мере удаления от береговых линий и для удаленных районов составляет несколько миллиметров.

Наконец, поправки в координаты станции за счет смещения положения полюса оцениваются по координатам полюса, оцениваемым IERS, прежде всего по данным радиоастрономических измерений. Набор ежесуточных значений, начиная с 1846 г., доступен на официальном сайте IERS [68].

Таким образом, перечисленные поправки требуют дополнительной входной информации сверх той, что получается при выполнении ГНСС-наблюдений. Для достижения максимальной точности для PPP алгоритма важно учитывать эти входные данные.

3.2 Анализ применения метода PPP для деформационного мониторинга различных инженерных сооружений

В настоящее время в зарубежных публикациях активно обсуждается вопрос применения метода PPP для деформационного мониторинга различных инженерных сооружений, в том числе, гидротехнических. В 2016 г. турецким ученым Semal Ozer Yigit [94] был проведен эксперимент по тестированию высокоскоростного метода PPP для измерения собственных колебаний, генерируемых модельным стержнем (рисунок 3.1). Под высокоскоростным методом следует понимать метод, в котором происходит определение координат с частотой 1 Гц и выше.



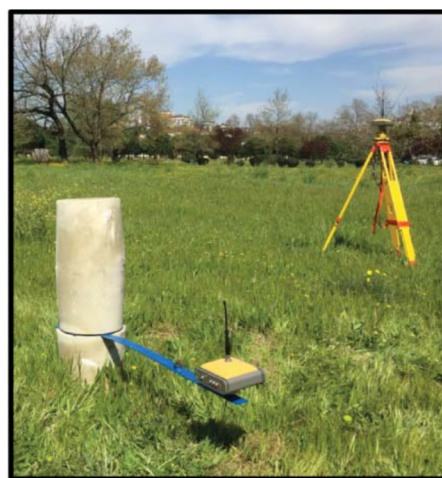
Рисунок 3.1 – Перемещение модельного стержня [94]

По результатам сравнения координат, полученных методом PPP, с результатами относительного позиционирования было установлено, что высокоскоростной метод PPP может регистрировать горизонтальные и вертикальные смещения с субсантиметровым уровнем точности за короткий период времени.

В работе [95] им были продолжены исследования по оценке вертикальных смещений, полученных методом PPP. Эксперименты выполнялись на специализированной полевой установке, показанной на рисунке 3.2.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Модели стальных стержней, использованные в экспериментах (а), и специализированная полевая установка (б) [95]

По результатам проведенных экспериментов была получена высокая корреляция между координатами, полученными высокоскоростным методом PPP, и координатами, определенными из относительного позиционирования, после удаления из них смещений и трендов, а также после применения сглаживающих фильтров для исключения низкочастотных компонент временного ряда, полученного методом PPP. Расхождение между координатами не превышало 10 мм.

В работах [62, 88, 89, 91–93] приведены результаты исследования высокоскоростного метода PPP для деформационного мониторинга мостовых переходов. По оценке китайских ученых [92, 93] для мониторинга прогиба моста с требуемой точностью методом PPP необходимо не менее 30 минут непрерывных наблюдений. Такое время сходимости обусловлено, прежде всего, ошибками интерполирования точных эфемерид (.sp3) и поправок к часам спутников (.clk) [63]. По оценке [24] эти ошибки составляют в среднем для поправок к часам спутника величину 0,031 м, а для точных эфемерид – 0,049 м. Другая ошибка может быть обусловлена наличием потерь счета циклов, которые могут быть «замаскированы» под шумом фазовых измерений [21]. В работе [62] отмечается, что точное определение прогиба моста методом PPP достигается только после нескольких минут времени сходимости, в случае срыва сигналов необходима повторная инициализация.

Начиная с 2017 г. и по настоящее время метод PPP активно тестируется на подвесном мосту длиной 1 600 м через реку Северн (Великобритания) [62, 88, 89, 91–93]. Длина главного пролета составляет 988 м. Мост возвышается над водной поверхностью на высоте 46 м. Два несущих троса подвешены к железобетонным пилонам высотой 135 м.

На мосту установлены девять мониторинговых ГНСС-приемников, в том числе четыре двухчастотных приемника Leica 1200 и один одночастотный приемник Leica SR510, расположенных на несущих тросах, и четыре двухчастотных приемника Leica SR530, расположенных на железобетонных пилонах. В пределах 2 км от моста расположены две базовые станции, оснащенные приемниками Leica GR10. На рисунке 3.3 показана схема размещения мониторинговых точек на Северном мосту.

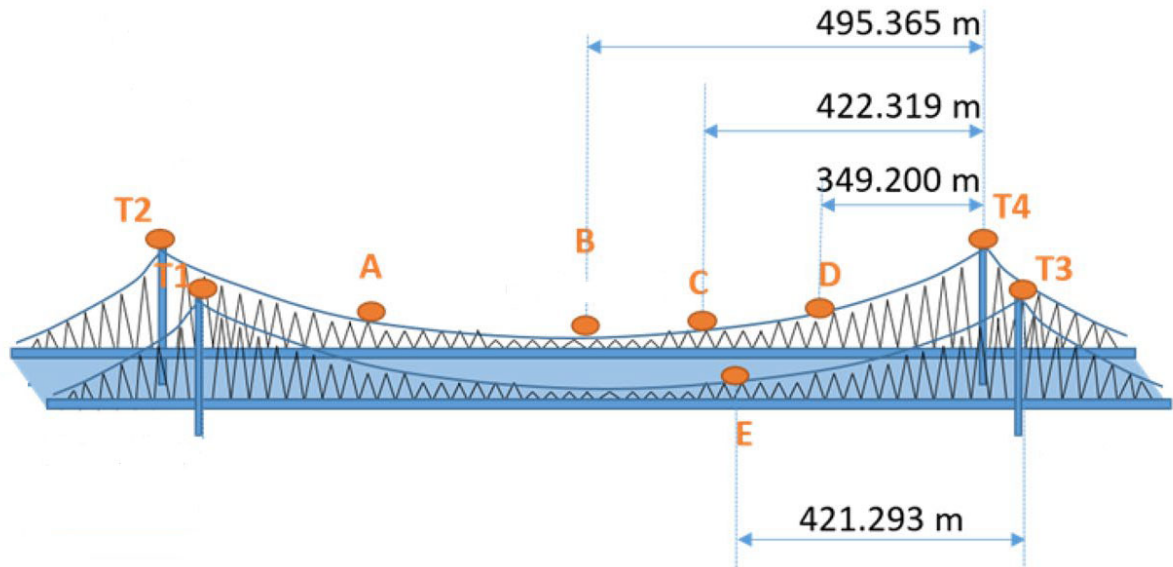


Рисунок 3.3 – Схема размещения мониторинговых точек на Северном мосту [88]

В работах [88, 92] описано применение метода PPP для мониторинга несущих тросов, подвешенных к железобетонным пилонам. По результатам исследования установлено, что метод PPP не позволяет определять малые смещения несущих тросов в продольном и поперечном компонентах. Исследования по повышению точности определения малых смещений несущих тросов ведутся в настоящее время [62, 91].

Вопросу применения метода PPP для мониторинга состояния гидротехнических сооружений посвящен ряд публикаций [15, 17, 18, 70, 71, 84]. Нигерийские ученые в своих работах [70, 71] проводили исследования по оценке положения базовых станций, входящих в системы деформационного мониторинга крупных плотин Джебба (Jebba Dam) и Икпоба (Ikroba Dam), с помощью онлайн-сервиса CSRS – PPP. Для оценки положения базовых станций авторы использовали различные наборы данных за 2007, 2008 и 2011 гг. По результатам постобработки данных за 2007 и 2008 г. ими были следующие средние квадратические ошибки положения базовой станции CFG113B:

- за 2007 г. – 5, 7 и 32 мм, по северной, восточной, и высотной компонентам;
- за 2008 г. – 5, 17 и 32 мм по северной, восточной, и высотной компонентам, соответственно.

В магистерской диссертации Raquel Lujan [84] описаны разработки по внедрения метода PPP в программное обеспечение GOCA, разработанное в университете прикладных наук г. Карлсруэ, профессором Reiner Jäger.

В России метод точного точечного позиционирования, как один из методов ГНСС-мониторинга, был протестирован на Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) [17]. Для эксперимента авторы выбрали две станции B10P и S33g, входящие в систему спутникового мониторинга СШГЭС. Станция B10P является базовой станцией. Она расположена на берегу русла реки. Абсолютная отметка станции B10P составляет 367,3 м. Станция S33g является мониторинговой станцией, она размещена на 33-й секции плотины ГЭС. Абсолютная отметка станции S33g составляет 548,6 м. Расстояние между двумя этими станциями приблизительно 1 550 м. Станции оснащены ГНСС-приемниками фирмы Leica Geosystems.

Для проведения эксперимента использовались ГНСС-измерения, собранные в период с 11.12.2016 по 17.12.2017. Дополнительно использовались измерения с автоматизированной метеостанции, расположенной на СШГЭС, а также данные об уровне воды в верхнем бьефе. Обработка измерений выполнялась в двух программных продуктах TropoGNSS и BERNESE. Программный продукт TropoGNSS был разработан в Казанском федеральном университете для решения задач в области ГНСС-метеорологии, в нем реализован метод точного точечного позиционирования [80].

В качестве входных данных программа использует файлы двухчастотных фазовых и кодовых измерений систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, сделанные только на одной станции, а также файлы точных орбит и часов спутников ГНСС. В качестве дополнительной информации используются файл параметров калибровок антенн, файл координат и тектонических скоростей станции, файл океанических нагрузок и файл параметров ориентации оси вращения Земли. Уравнивание измерений производится с помощью фильтра Калмана. Точность оценки всех выходных параметров зависит от длины сессии измерений, а также от числа использованных в обработке навигацион-

ных систем. Для суточной сессии внутренняя оценка точности (основанная на внутренней сходимости) определения координат составляет 1–3 мм.

Данные с двух станций обрабатывались посуточно в обеих программах. По результатам обработки были получены временные ряды, описывающие изменение положения этих станций за период с 11.12.2016 по 17.12.2017. Перед последующим анализом из полученных временных рядов авторы вычли смещения, вызванные поступательным движением литосферных плит. Поступательные движения оценивались согласно модели NUVEL-1A [69]. Для последующего анализа геоцентрические координаты двух станций были преобразованы в топоцентрические по следующим формулам:

$$\begin{bmatrix} E_{12} \\ N_{12} \\ U_{12} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_1 \cdot \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} E_{21} \\ N_{21} \\ U_{21} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_2 \cdot \begin{bmatrix} X_1 - X_2 \\ Y_1 - Y_2 \\ Z_1 - Z_2 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

где $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ – матрицы вращений, которые вычисляются с помощью геодезических координат (B, L) точек 1 и 2:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} -\sin L_1 & \cos L_1 & 0 \\ -\sin B_1 \cdot \cos L_1 & -\sin B_1 \cdot \sin L_1 & \cos B_1 \\ \cos B_1 \cdot \cos L_1 & \cos B_1 \cdot \sin L_1 & \sin B_1 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} -\sin L_2 & \cos L_2 & 0 \\ -\sin B_2 \cdot \cos L_2 & -\sin B_2 \cdot \sin L_2 & \cos B_2 \\ \cos B_2 \cdot \cos L_2 & \cos B_2 \cdot \sin L_2 & \sin B_2 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

На рисунках 3.4 и 3.5 показаны временные ряды, описывающие изменение положения станции S33g по северной компоненте (N), и по восточной (E), вычисленные в двух программных продуктах TropoGNSS и BERNES. Графики изменений координат в обоих случаях сдвинуты на произвольную величину. Дополнительно на рисунках 3.4 и 3.5 отображено изменение уровня воды в верхнем бьефе.

Расхождения между двумя решениями для станции S33g характеризуются следующими СКО: 2,1 мм для северной, 3,4 мм для восточной и 6,3 мм для высотной координаты. В свою очередь для станции b10p СКО расхождений между решениями составило 2,0 мм для северной координаты, 3,5 для восточной и 7,5 мм для высотной. При этом имеет место некоторая корреляция расхождений координат для рассматриваемых станций. Поэтому приращения координат между станциями, определенные каждым из двух методов, имеют меньшее СКО расхождение: 1,4 мм по северной координате, 2,2 мм по восточной и 4,3 мм по высотной.

Вариации высотной компоненты, показанные на рисунке 3.6, подвержены влиянию двух факторов:

- изменению атмосферных нагрузок;
- изменению уровня воды в верхнем бьефе.

За рассматриваемый период атмосферное давление в районе ГЭС менялось от 946,2 до 992,0 гПа, а уровень воды – с 500 до 538,6 м.

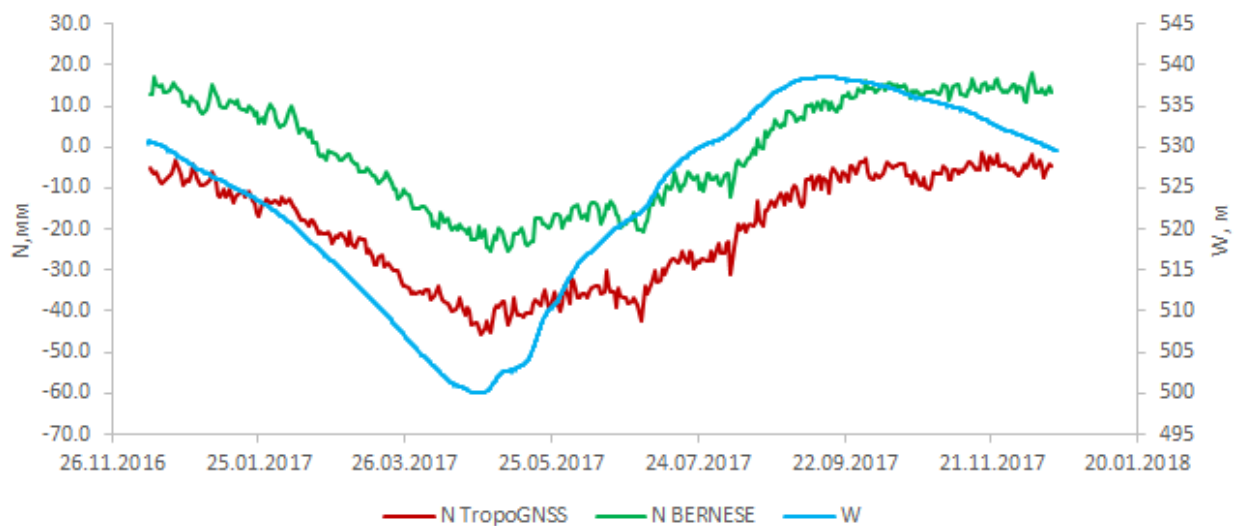


Рисунок 3.4 – Временные ряды, описывающие изменение положения станции S33g по северной компоненте (N)

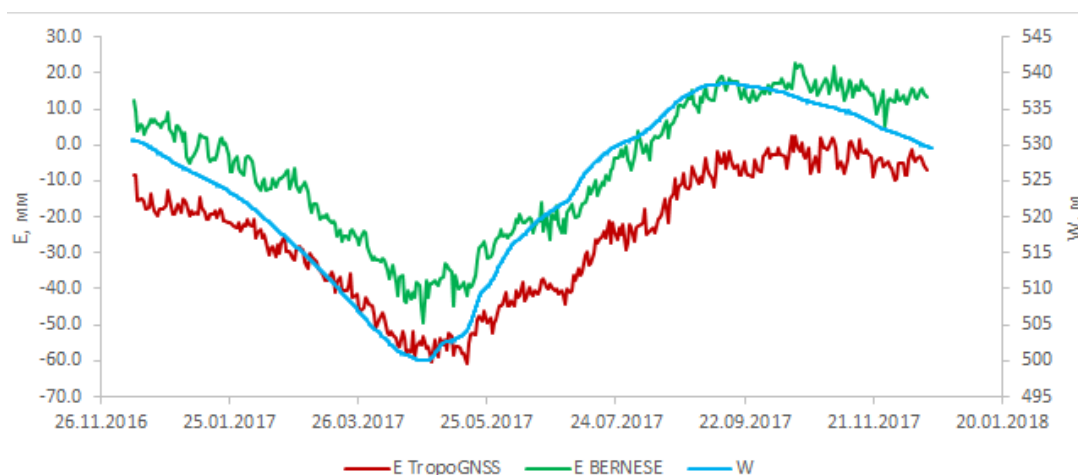


Рисунок 3.5 – Временные ряды, описывающие изменение положения станции S33g по восточной компоненте (E)

Для определения влияния атмосферного давления (P), а также уровня воды в верхнем бьефе (H) на вариации высотной компоненты авторы [17] ввели линейную функцию вида

$$U = K_P \cdot (P - P_0) + K_H \cdot (H - H_0), \quad (3.12)$$

где P_0 и H_0 – средние значения давления и уровня воды в верхнем бьефе за рассматриваемый период;

K_P и K_H – искомые регрессионные коэффициенты линейной функции.

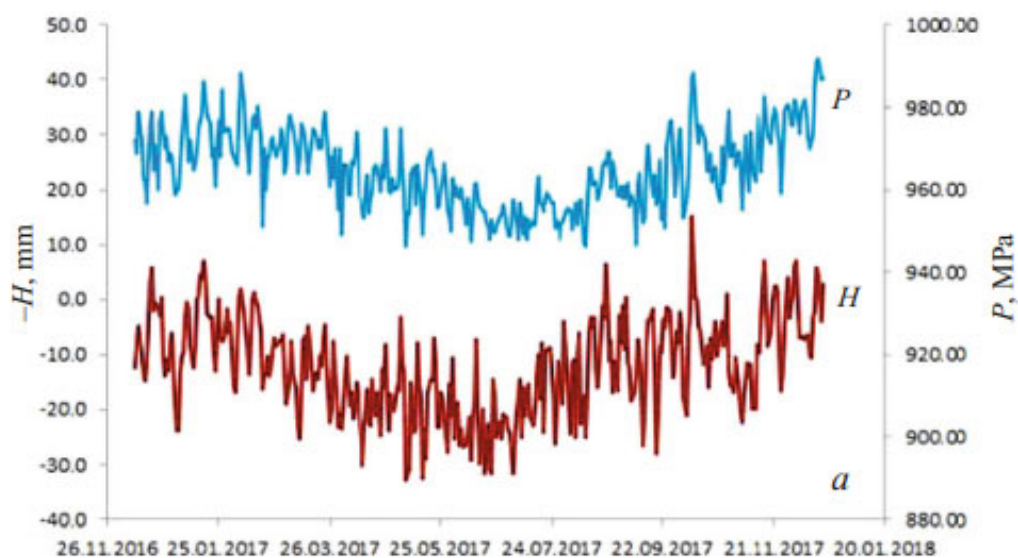


Рисунок 3.6 – Временные ряды, описывающие изменение положения станции b10p по высотной компоненте

Искомые регрессионные коэффициенты были получены методом наименьших квадратов. Для станции В10Р они составили $K_P = (-0,68 \pm 0,06)$ мм/гПа и $K_H = (-0,25 \pm 0,04)$ мм/м, для станции S33g – $K_P = (-0,49 \pm 0,06)$ мм/гПа и $K_H = (0,23 \pm 0,04)$ мм/м, соответственно. Расхождение в регрессионных коэффициентах на эти станциях обусловлено различным положением станций относительно водохранилища, а также высотным смещением тела плотины.

3.3 Обоснование применения метода точного точечного позиционирования для геодезического мониторинга гидротехнических сооружений

3.3.1 Сравнительный анализ точности ГНСС-наблюдений относительным методом и методом PPP в сети геодезического мониторинга гидротехнического сооружения

Метод точного точечного позиционирования, как показано в 3.2, позволяет осуществлять спутниковый мониторинг различных инженерных сооружений, в том числе и гидротехнических. Но при этом следует отметить ряд необходимых условий, которые следует учесть при выполнении спутникового мониторинга с помощью метода PPP, а именно координаты, определенные методом PPP, чувствительны к локальной геодинاميке, атмосферным нагрузкам, а также нагрузкам от изменения запасов воды в водоемах и др., поэтому при проведении спутникового мониторинга необходимо исключить или минимизировать все возможные ошибки, оказывающие влияние на метод PPP. Стоит отметить еще один немаловажный фактор, который заключается в следующем: локальная геодинاميка, атмосферные нагрузки, а также нагрузки от изменения запасов воды в водоемах будут меняться от объекта к объекту, поэтому применимость метода PPP для спутникового мониторинга гидротехнического сооружения, в частности Загорской ГАЭС-2, должна быть строго обоснована.

Для обоснования применения метода PPP для спутникового мониторинга гидротехнических сооружений был проведен следующий эксперимент, заключающийся в сравнении результатов, полученных методом PPP и относительным методом на станциях GPS5, GPS1 и P29 [18]. Станции GPS5, GPS1 расположены на склоне, P29 – на плотине водоприемника (рисунок 3.7).

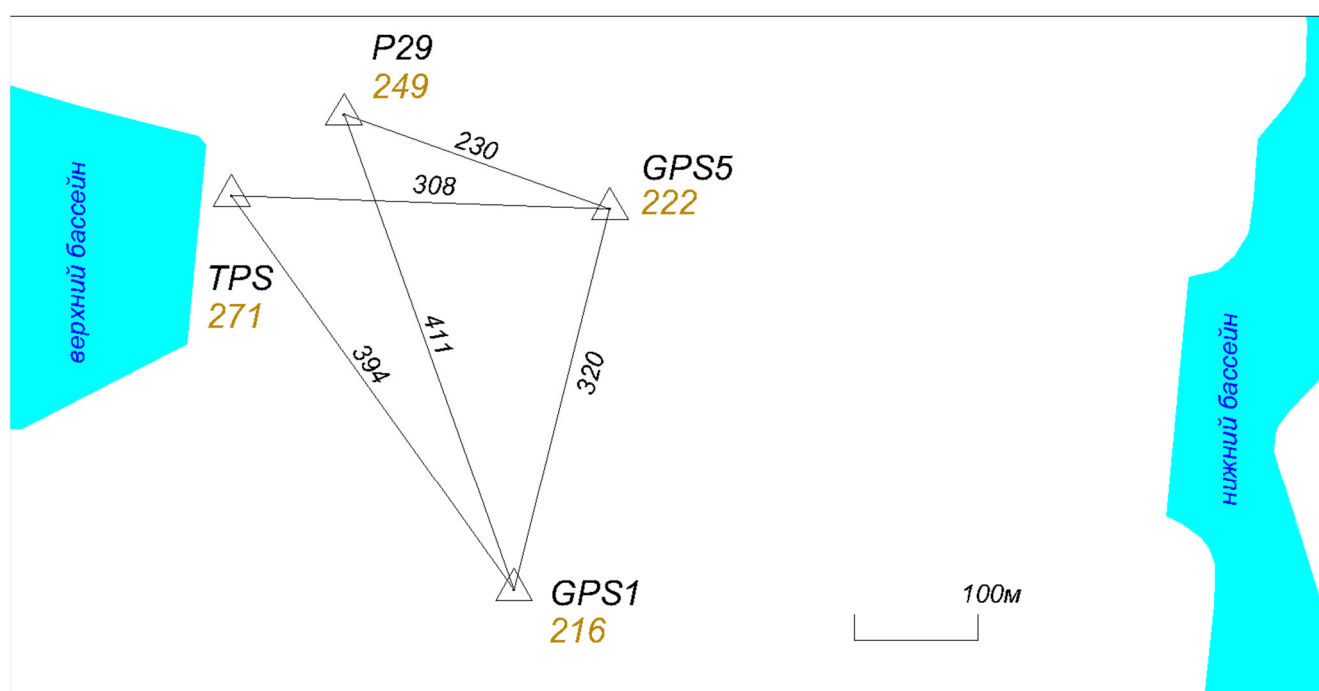


Рисунок 3.7 – Сеть геодезического мониторинга гидротехнического сооружения

На рисунке 3.7 показаны длины базовых линий, а также приведены приближенные абсолютные отметки станций, участвующих в эксперименте.

Координаты всех станций TPS, GPS5, GPS1 и P29 были определены методом PPP с использованием точных эфемерид в программном продукте TropicGNSS. Координаты станций GPS5, GPS1 и P29 определялись относительным методом с помощью программного продукта Topcon Tools, в качестве базовой станции использовалась станция TPS, координаты которой были взяты из решения методом PPP. Продолжительность измерений варьировалась от 5 до 17 часов. В таблице 3.1 приведены результаты сравнений.

Таблица 3.1 – Результаты сравнения координат станций сети геодезического мониторинга гидротехнического сооружения, полученных относительным методом и методом PPP

Станция	Длительность наблюдений, ч	Δx , мм	Δy , мм	Δh , мм
26.02.2019				
GPS5	15,0	-3	-3	-11
GPS1	15,0	-2	-7	-10
P29	15,0	-3	-5	-5
27.02.2019				
GPS5	5,5	-3	-4	-16
GPS1	5,5	0	-6	-10
P29	5,5	0	-8	-3
28.02.2019				
GPS5	15,7	-2	0	-4
GPS1	15,6	-2	-4	6
TPS	17,0	0	0	0
01.03.2019				
GPS5	6,0	-3	-4	-9
GPS1	5,0	-2	-5	3
TPS	7,2	2	-1	-16

Хорошо видно, что отклонения в северном и восточном направлениях не превышают 8 мм и имеют стандартное отклонение по 2 мм. Отклонения в высотном направлении в несколько раз хуже.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости метода PPP, использующего точные эфемериды и поправки часов навигационных спутников, в сетях мониторинга ГТС. Однако поскольку указанные точности достигаются путем обработки измерений, собранных на интервалах от 5 часов и более, то метод PPP применим главным образом для наблюдений за долгопериодическими перемещениями.

3.3.2 Исследование применимости метода PPP для контроля положения опорных пунктов и станций тахеометров автоматизированной системы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений

Данные с восьми станций автоматизированной системы геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2, собранные за период с 23 февраля по 23 апреля 2022 г., были обработаны методом PPP с помощью приложения TropoGNSS [80]. В обработке использованы двухчастотные двухсистемные ГНСС-наблюдения. Угол отсечки по возвышению спутников 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 (Немецкий центр исследования Земли им. Гельмгольца).

Параметры калибровок антенны навигационных спутников и наземных приемников были взяты из последней версии файла `ngs14.atx`, публикуемого NGS NOAA (Национальная геодезическая служба Национального управления по атмосферным и океаническим исследованиям США).

Данные с каждой станции обрабатывались суточными пакетами, в результате чего оценивались среднесуточные значения геоцентрических координат станций, а также зенитная тропосферная задержка, градиентные параметры тропосферной задержки, поправки часов приемника и расхождения между шкалами системного времени GPS и ГЛОНАСС.

Для достижения максимальной стабильности оцениваемых координат станций в обработке учитывались приливные эффекты (твердые приливы, океанические нагрузки, движения полюсов). Для моделирования твердых приливов не требуется какой-либо дополнительной внешней информации. В свою очередь, для учета океанических нагрузок необходим файл формата BLQ, содержащий сведения об амплитуде и фазе 11 основных океанических приливов для района работ. Этот файл был сгенерирован с использованием сервиса обсерватории Онсала (Швеция) [87].

Для моделирования влияния на координаты станций движения полюсов использовался долгосрочный продукт Международной службы вращения Земли и систем координат (IERS) EOP 14 C04 (IAU2000A), содержащий среднесуточные значения смещений положения полюса начиная с 1962 г.

Также дополнительно учитывалось поступательное движение Евразийской тектонической плиты, геоцентрические скорости которой для района работ были вычислены с помощью модели NUVEL-1A [69].

Для удобства интерпретации результатов, вариации среднесуточных координат станций на рисунках 3.8–3.10 были представлены в виде топоцентрических смещений относительно положения в первый день обработки (23 февраля 2022 г.).

Из рисунков можно сделать следующие выводы: смещения на большинстве станций имеют схожий график, за исключением станций GPS3, GPS4 и GPS9, которые имеют смещения, отличные более чем на 5 мм от остальных станций. Это говорит о нестабильном положении указанных станций, что подтверждается данными установленных в системе мониторинга автоматизированных тахеометров.

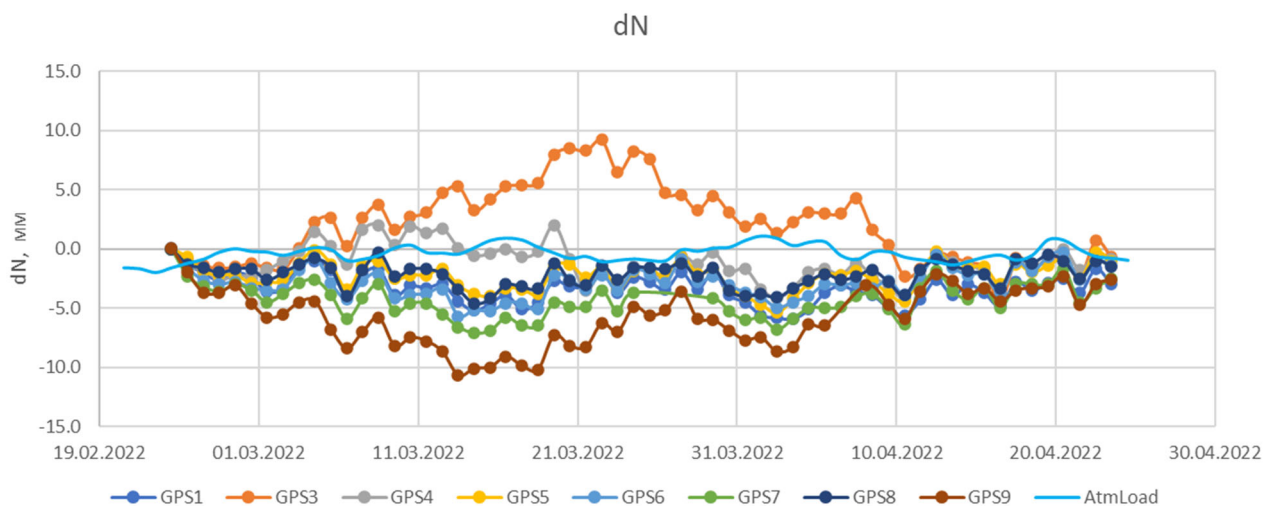


Рисунок 3.8 – Вариации смещений в северном направлении

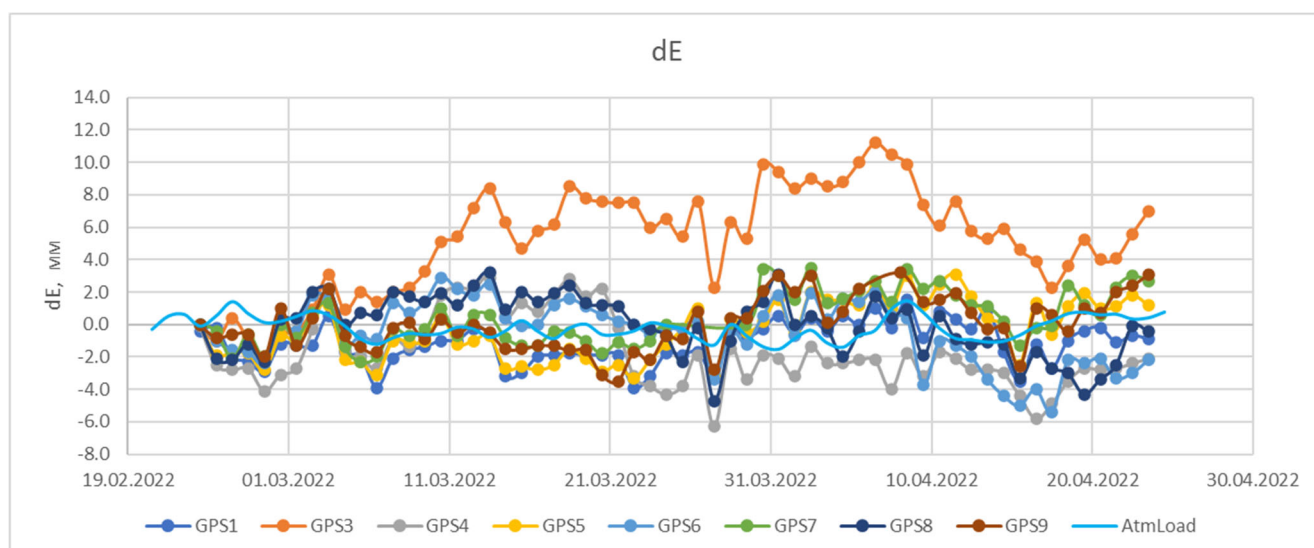


Рисунок 3.9 – Вариации смещений в восточном направлении

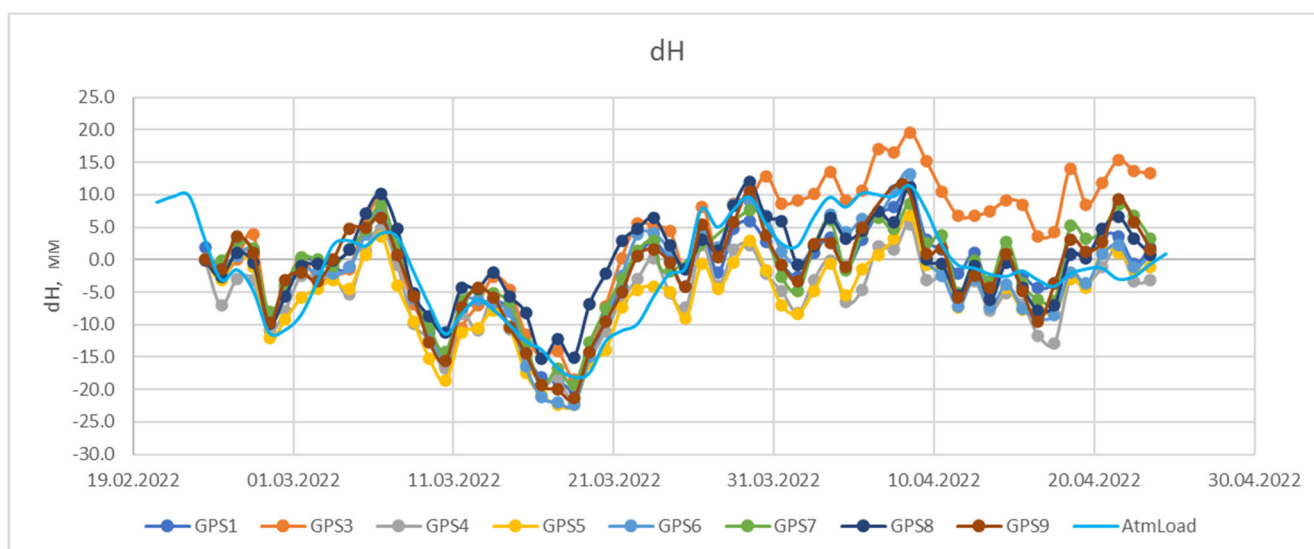


Рисунок 3.10 – Вариации смещений в высотном направлении

В целом размах вариаций смещений составляет для северной и восточной компонент около 8 мм, тогда как для высотной около 32 мм. В этих вариациях присутствуют как реальные смещения станций, так и ошибки оценок координат, которые далее удобно охарактеризовать с помощью стандартных отклонений.

Стандартные отклонения вариаций топоцентрических смещений на каждой станции представлены на рисунке 3.11.

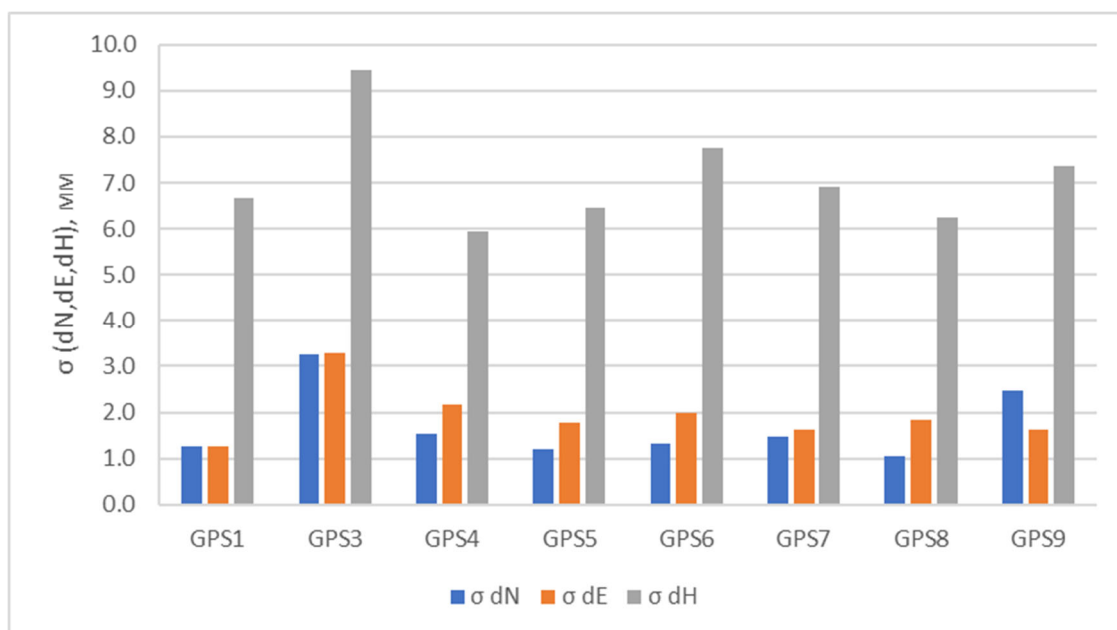


Рисунок 3.11 – Стандартные отклонения топоцентрических смещений

Стандартные отклонения по плановым координатам больше 2 мм имеют только нестабильные станции GPS3, GPS4 и GPS9. По высоте все стабильные станции имеют стандартные отклонения меньше 7 мм.

В отсутствие альтернативных методик определения смещений нельзя вычлени в представленных стандартных отклонениях долю реальных смещений станций и смещений, вызванных ошибками определения координат. При этом стоит помнить, что реальными смещениями могут быть, в том числе и разномасштабные неприливные движения земной коры, обычно не моделируемые в реализациях метода PPP. Очевидно, что крупномасштабные эффекты для сравнительно близкорасположенных станций сильно коррелированы и могут быть исключены путем анализа вариаций разностей координат между станциями. В этих разностях будут присутствовать только локальные смещения, наиболее важные при мониторинге ГТС. Однако концепция использования метода PPP в мониторинге ГТС заключается в том, чтобы отказаться от всевозможных разностных схем и рассматривать вариации непосредственно абсолютных координат. По этой причине следует считать ошибки определения смещений как собственные ошибки, вызванные различными источниками (погрешности эфемерид и поправок часов спутников и др.), так

и реальные крупномасштабные смещения неприливной природы. Очевидно, что смещения станций, характеризуемые стандартными отклонениями 2 мм в плане и 7 мм по высоте, связаны главным образом именно с этими двумя составляющими. Вклад локальных смещений в эти оценки невелик и его не стоит выделять, чтобы не давать завышенных оценок точности метода PPP. При доверительной вероятности $P = 0,997$ предельная ошибка определения смещения станции равна 6 мм в плане и 21 мм по высоте.

Очевидно, что хотя бы частичный учет неприливных эффектов позволит существенно увеличить применения метода PPP для мониторинга вертикальных движений. Как было указано выше, из приливных эффектов в обработке были учтены твердые приливы, океанические нагрузки и движения полюсов. По причине алгоритмических сложностей в настоящее время, как правило, реализации метода PPP, включая TropoGNSS, не учитывают неприливные эффекты, крупнейшим из которых являются атмосферные нагрузки. Для демонстрации их влияния на рисунках 3.8–3.10 дополнительно показаны смещения из-за атмосферных нагрузок, смоделированные с использованием сервиса NASA International Mass Loading Service [86]. Этот сервис в качестве входных данных использует реальные данные о полях приземного атмосферного давления.

Из рисунка 3.10 можно сделать вывод, что основная часть вариаций высотной компоненты вызвана как раз влиянием атмосферных нагрузок, корреляция между вариациями высотной компоненты и смещениями земной коры по высоте из-за атмосферных нагрузок составила 83 %. Коэффициент корреляции определялся по формуле

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}. \quad (3.13)$$

После вычитания смоделированного вклада атмосферных нагрузок размах вариации высотной компоненты значительно сокращается: примерно с 32 мм до 19 мм (рисунок 3.12).

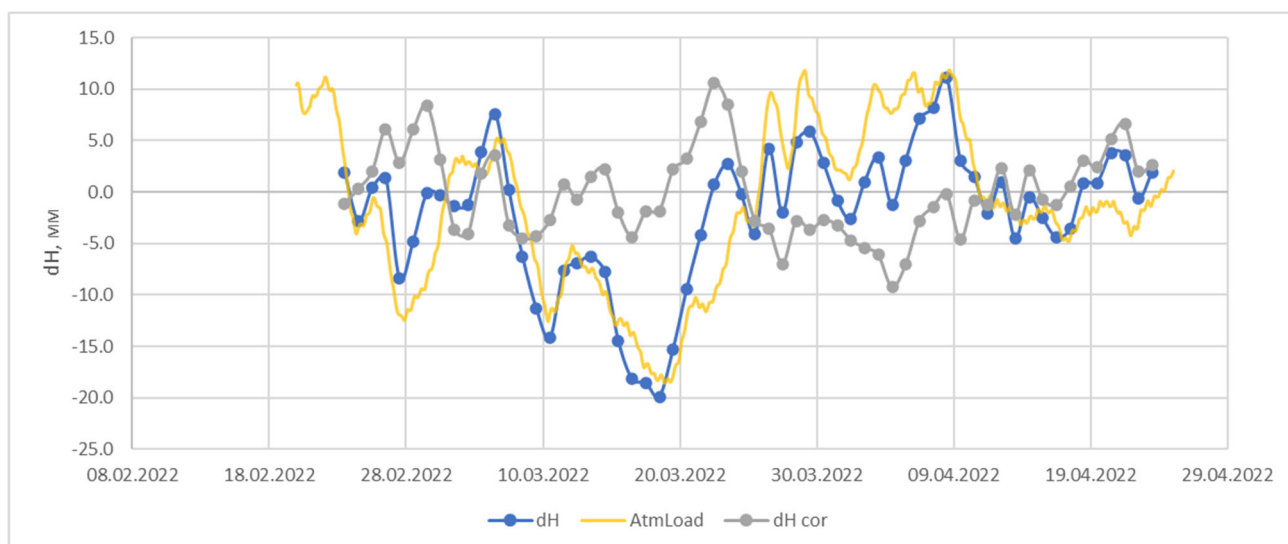


Рисунок 3.12 – Вариации смещений по высоте на станции GPS1 до и после коррекции влияния атмосферных нагрузок

С учетом атмосферных нагрузок стандартное отклонение вариаций высотной компоненты для стабильных станций не превышает 5 мм, что позволяет установить факт смещения по высоте величиной от 15 мм. Вклад эффекта атмосферных нагрузок на плановые смещения слаб и менее очевиден.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- метод PPP позволяет выявить плановые смещения станции, величина которых превосходит 6 мм;
- максимальный размах вариаций (32 мм) высотной компоненты не связан с ошибками определения координат методом PPP, а определяется реальным движением земной коры под действием барических образований. Показано, что без учета барических образований метод PPP позволяет выявлять вертикальные смещения, превосходящие величину 21 мм, а с учетом атмосферных нагрузок можно выявлять смещения величиной 15 мм;
- полученные методом PPP вариации как плановых, так и высотных компонент достаточно коррелированы, что может говорить как о влиянии одних и тех же источников ошибок (например, эфемеридной информации), так и о реальных смещениях, общих для всех станций. Однако данных, использованных в этом исследовании, недостаточно, чтобы разделить эти составляющие;

— выявленные с использованием метода PPP пространственные смещения станций GPS3 и GPS4 подтверждаются данными наблюдений автоматизированных тахеометров.

Таким образом, можно сделать следующий вывод. Метод PPP может быть применен для контроля пространственного положения опорных пунктов и станций тахеометров автоматизированной системы геодезического мониторинга гидротехнических сооружений.

3.4 Выводы по третьему разделу

В третьем разделе описан метод точного точечного позиционирования (PPP), проведен анализ применения метода PPP для геодезического мониторинга искусственных сооружений.

Выполнено обоснование применения метода точного точечного позиционирования для геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания. Сравнение метода PPP и результатов относительных измерений показало, что разница в плане не превышает 8 мм по каждой из координат со средней квадратической ошибкой 2 мм. Разница по высоте составила не более 16 мм.

Проведено исследование применимости метода PPP на основе данных ГНСС-приемников, установленных на станциях тахеометров и опорных пунктах в автоматизированной системе геодезического мониторинга. Определены стандартные отклонения топоцентрических смещений, по величине которых можно сделать вывод, что метод PPP позволяет достоверно получать смещения станции величиной от 6 мм в плане и от 21 мм по высоте. Результаты апробации показали нестабильность ГНСС-станций GPS3 и GPS4, что подтверждается данными наблюдений автоматизированных тахеометров.

Полученные в третьем разделе результаты позволяют сделать вывод о применимости метода PPP для мониторинга смещений опорных пунктов и станций тахеометров в автоматизированной системе геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания с требуемой для этого точностью.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО НАГНЕТАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2)

4.1 Методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания

Для повышения точности и надежности геодезического мониторинга пространственного положения гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания с помощью автоматизированных средств измерений была разработана следующая методика.

Методика заключается в непрерывном контроле 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 инъецирования.

Всего в разработанной методике можно выделить девять основных этапов ее реализации, которые показаны ниже.

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 4.1.

Одним из важных элементов предлагаемой методики является контроль пространственного положения опорных пунктов и станций автоматизированных тахеометров системы мониторинга методом точного точечного позиционирования (PPP), в результате которого выполняется 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.

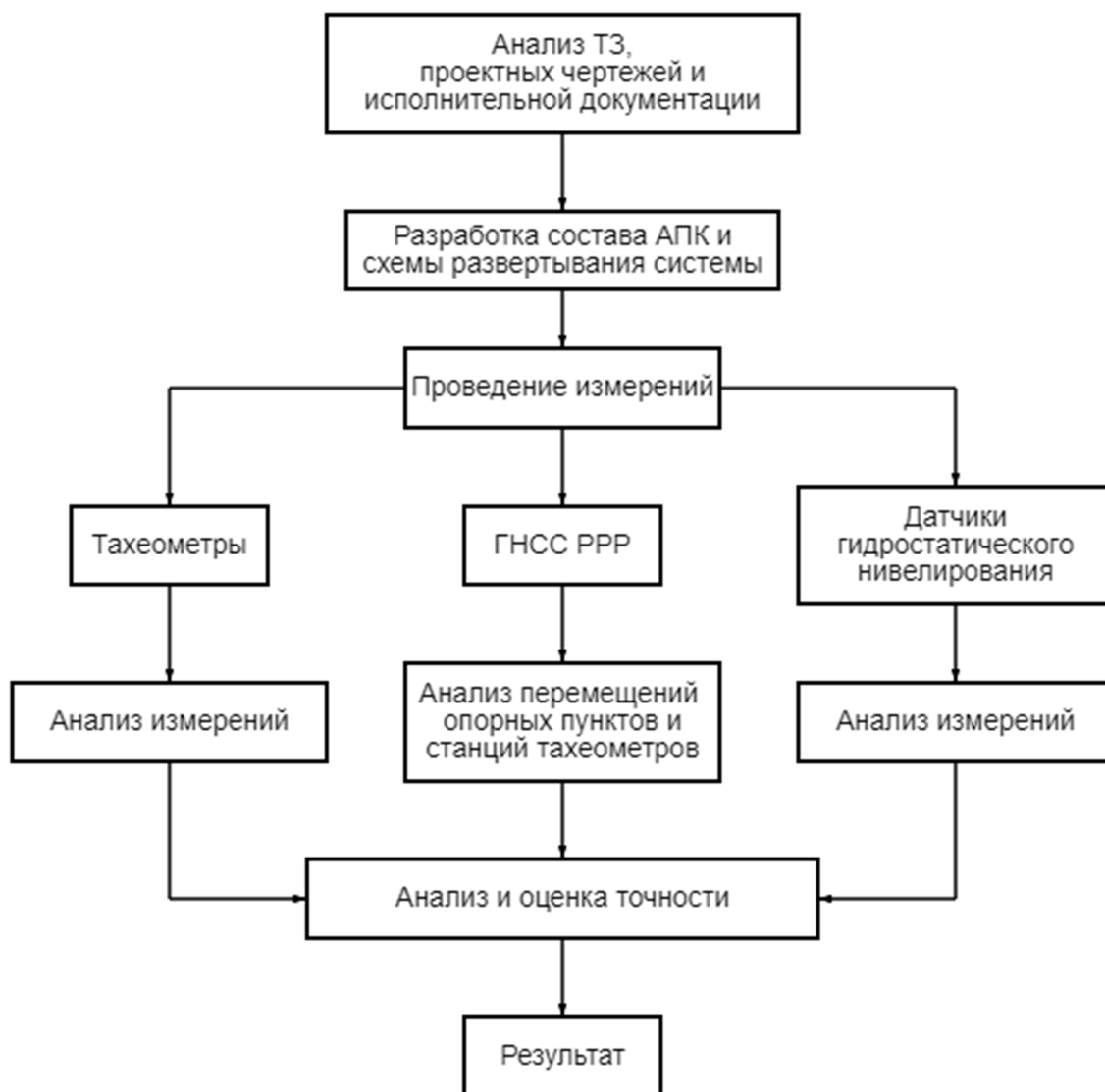


Рисунок 4.1. – Блок-схема методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания

4.2 Апробация методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания на Загорской ГАЭС-2

4.2.1 Структура и состав автоматизированной системы геодезического мониторинга здания Загорской ГАЭС-2

Для обеспечения требуемой точности мониторинга пространственного положения здания Загорской ГАЭС-2 и оперативности получения результатов предлагается структура АСГМ, которая основана на использовании тахеометрических наблюдений для мониторинга планового и высотного положения плиты перекры-

тия здания, гидростатического нивелирования для отслеживания высотного положения подземной части здания, а также статических ГНСС-наблюдений для контроля положения опорных пунктов и станций тахеометров. Исходя из предлагаемой структуры автоматизированной системы, определены схема, а также состав оборудования и программного обеспечения.

При разработке схемы АСГМ учитывались следующие требования:

- 1) марки автоматизированного тахеометра устанавливаются на сооружениях;
- 2) каждая марка мониторинга для контроля наблюдается минимум с двух тахеометров;
- 3) расстояния от автоматизированного тахеометра до марки не должны превышать 300 м;
- 4) автоматизированные тахеометры контролируют свое положение методом обратной засечки минимум на три опорных пункта;
- 5) положение опорных пунктов и станций тахеометров дополнительно контролируется с использованием ГНСС-приемников в режиме статических наблюдений.

Исходя из основных видов наблюдений, определенных структурой, их точности и оперативности, предлагается следующий состав автоматизированной системы геодезического мониторинга пространственного положения здания Загорской ГАЭС-2:

- 1) геодезическая контрольно-измерительная аппаратура (КИА), состоящая:
 - из автоматизированных тахеометров;
 - ГНСС-приемников с антеннами;
 - опорных отражателей;
 - мониторинговых отражателей;
 - датчиков гидростатического нивелирования (ДГН);
 - метеостанций;
- 2) автоматизированный программный комплекс, который представлен:
 - информационными средствами связи и передачи данных;
 - программными комплексами опроса КИА и передачи данных;
 - программными комплексами обработки, анализа и визуализации полученной информации.

В таблице 4.1 приведен перечень и количество контрольно-измерительной аппаратуры, входящей в автоматизированную систему непрерывного мониторинга пространственного положения ГТС.

Таблица 4.1 – 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	

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 PPP.

Схема расположения опорных пунктов и станций автоматизированных тахеометров системы мониторинга пространственного положения здания Загорской ГАЭС-2 представлена на рисунке 4.2.

Пространственное положение плиты перекрытия здания Загорской ГАЭС-2 в АСГМ контролируется с помощью автоматизированных тахеометров по маркам, установленным на отметке 166,40 м (рисунок 4.3). На отметке 125,10 м в галерее, помещении насосных и в отсасывающих трубах установлены датчики гидростатического нивелирования, которые показывают вертикальные перемещения подземной части здания. Все датчики соединены между собой гидравлической трубой. Схема размещения датчиков гидростатического нивелирования представлена на рисунке 4.4.

Расположение марок автоматизированного тахеометра и датчиков гидростатического нивелирования показано на разрезе здания ГАЭС (рисунок 4.5).

В таблице 4.2 приведена периодичность проведения инструментальных наблюдений за пространственным положением Загорской ГАЭС-2.

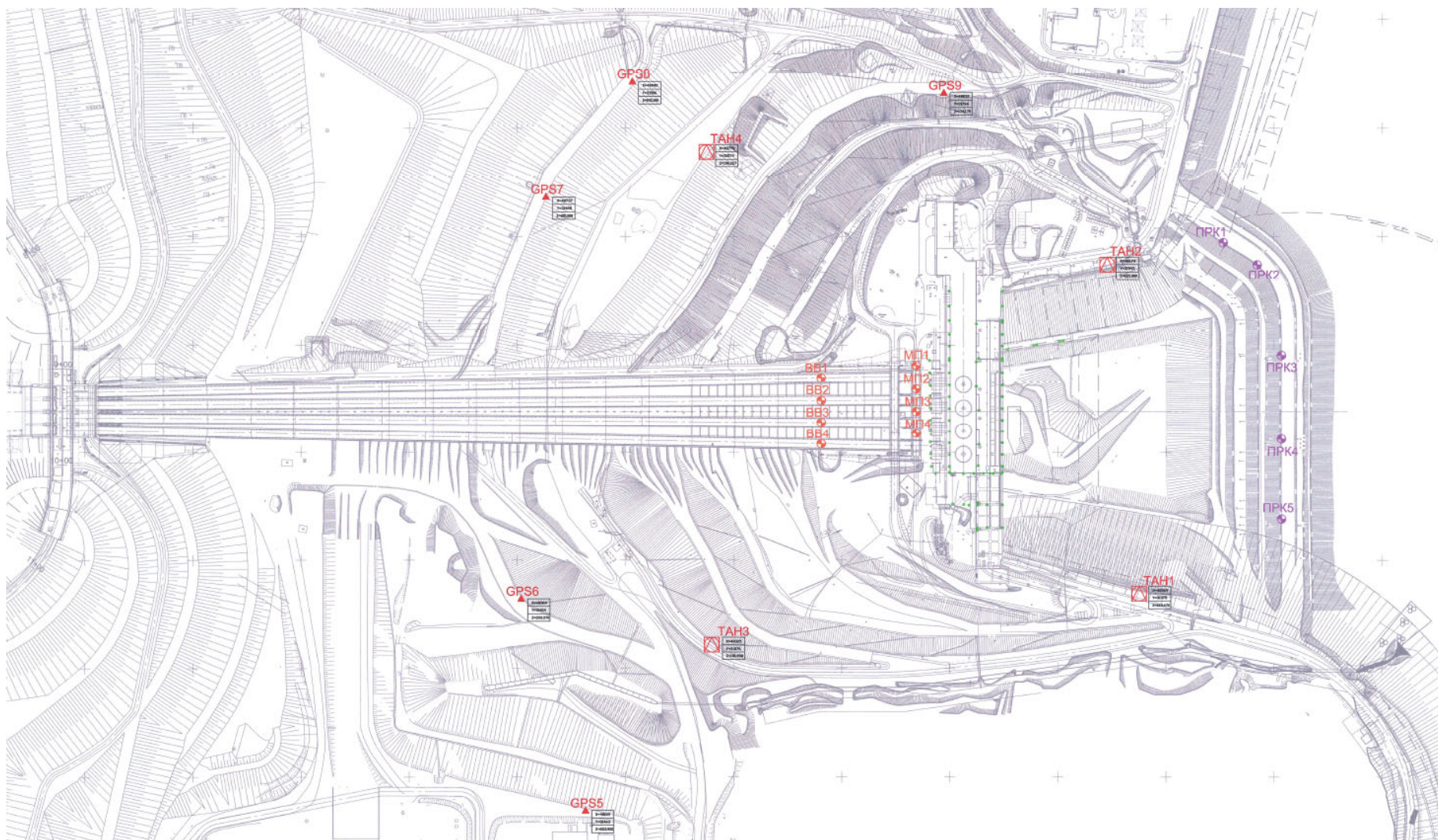


Рисунок 4.2 – Схема расположения опорных пунктов и станций автоматизированных тахеометров системы мониторинга пространственного положения здания Загорской ГАЭС-2

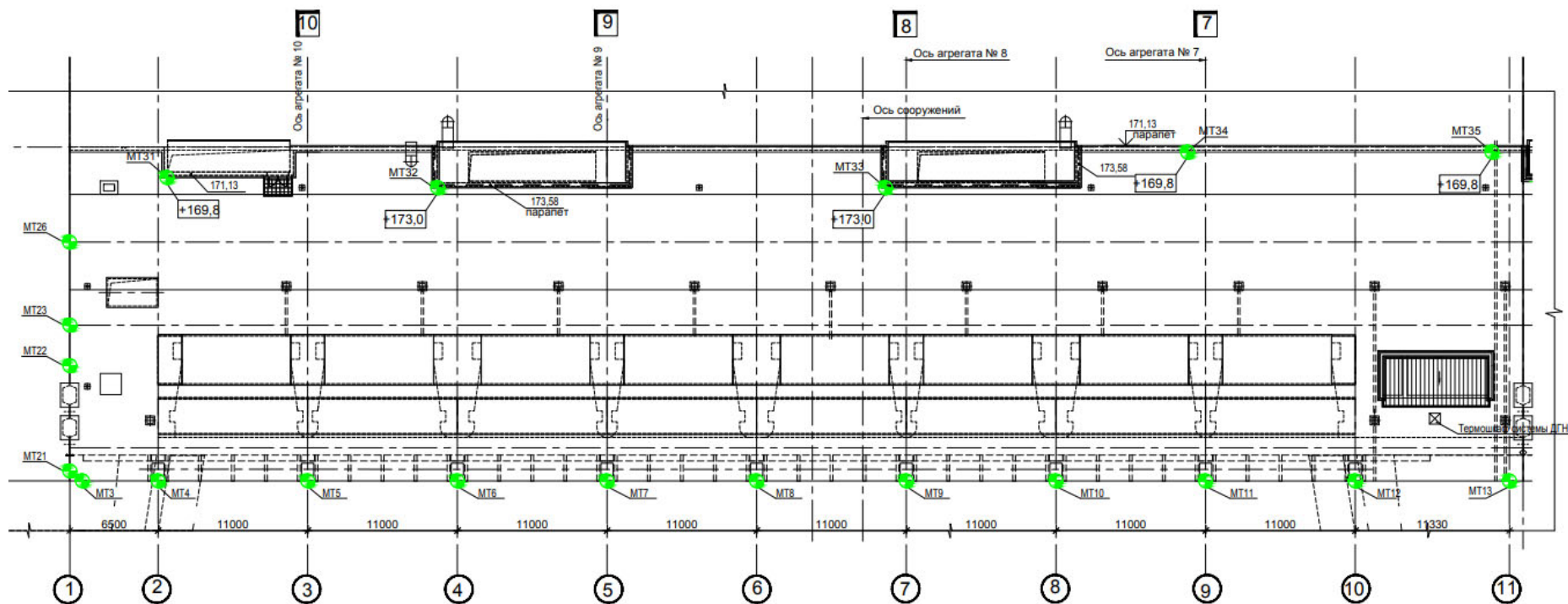


Рисунок. 4.3 – Схема размещения марок на отм. 166,40 м

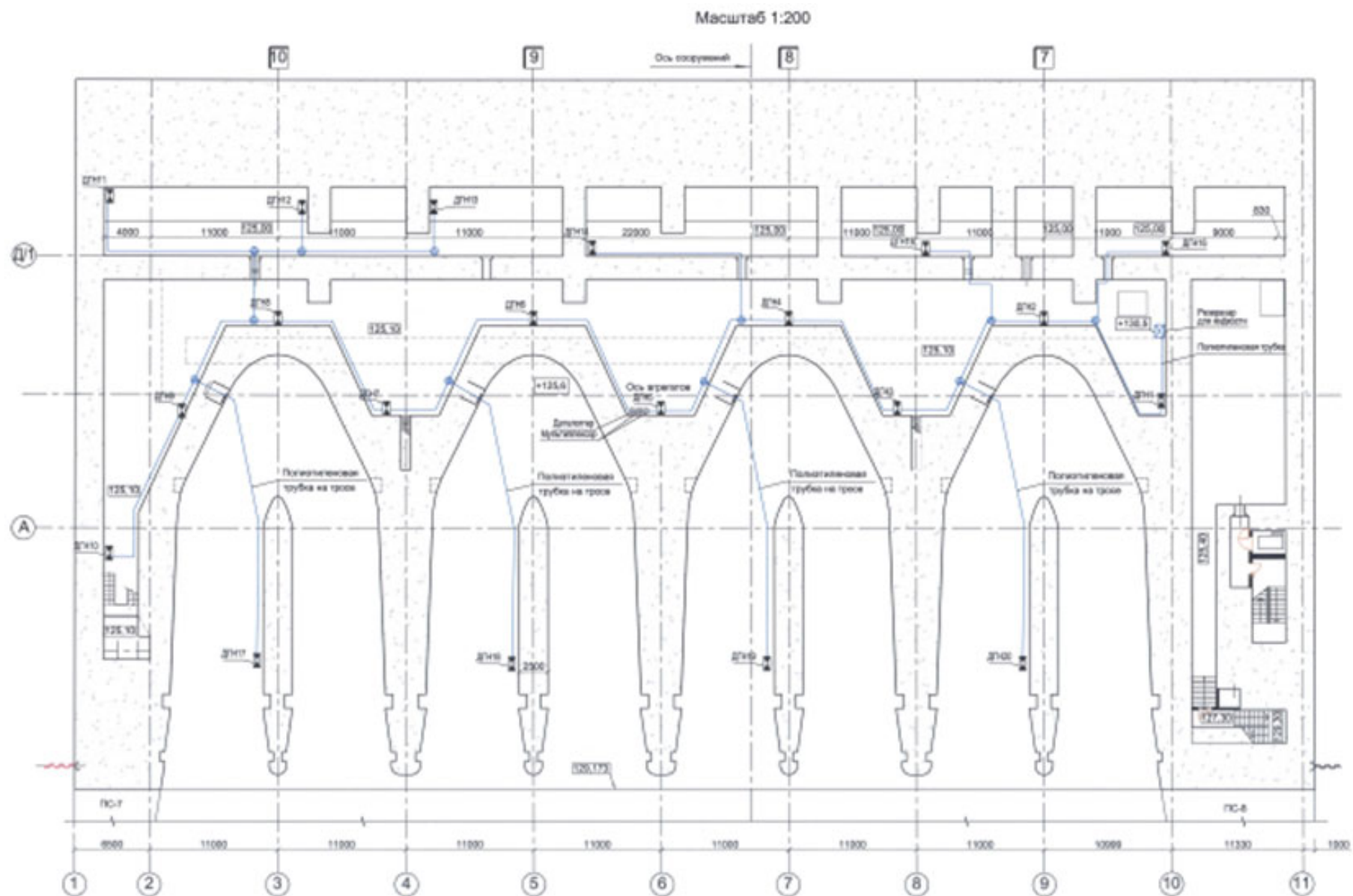


Рисунок. 4.4 – Схема размещения датчиков гидростатического нивелирования на отм. 125,10 м

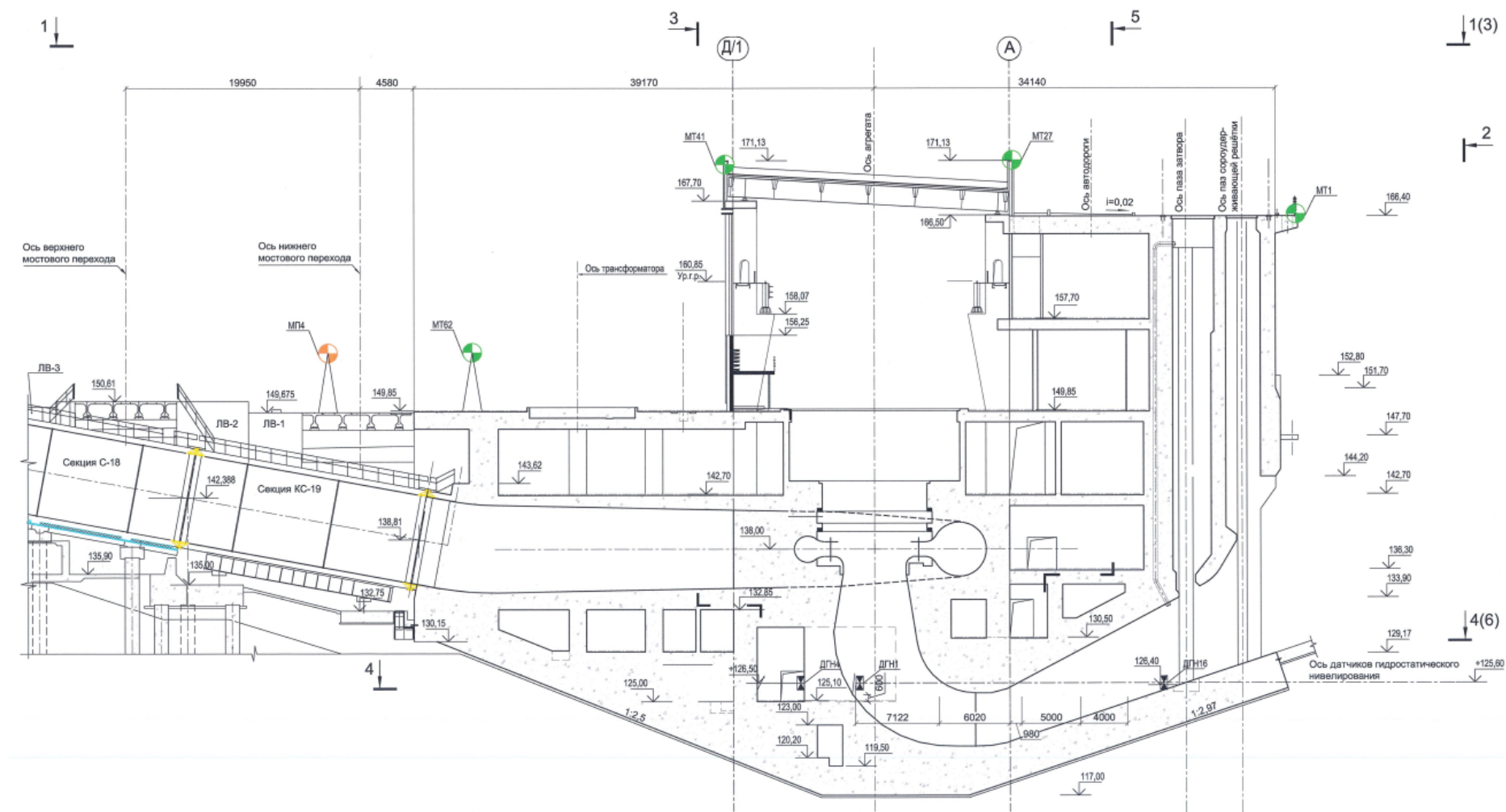


Рисунок 4.5 – Расположение марок тахеометра и датчиков гидростатического нивелирования. Разрез здания ГАЭС

Таблица 4.2 – 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**
Примечания: * При условии работы автоматизированной системы геодезического мониторинга. ** В случае выхода из строя автоматизированной системы геодезического мониторинга.		

Схема аппаратно-программного комплекса автоматизированной системы геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2 приведена на рисунке 4.6.

Аппаратно-программный комплекс работает следующим образом. Данные с автоматизированных тахеометров, метеостанций и датчиков гидростатического нивелирования поступают в программный комплекс Leica GeoMoS. Программное обеспечение Leica GNSS Spider автоматически обрабатывает данные с ГНСС-приемников и передает результаты обработки в виде приращений координат по измеряемым линиям в Leica GeoMoS.

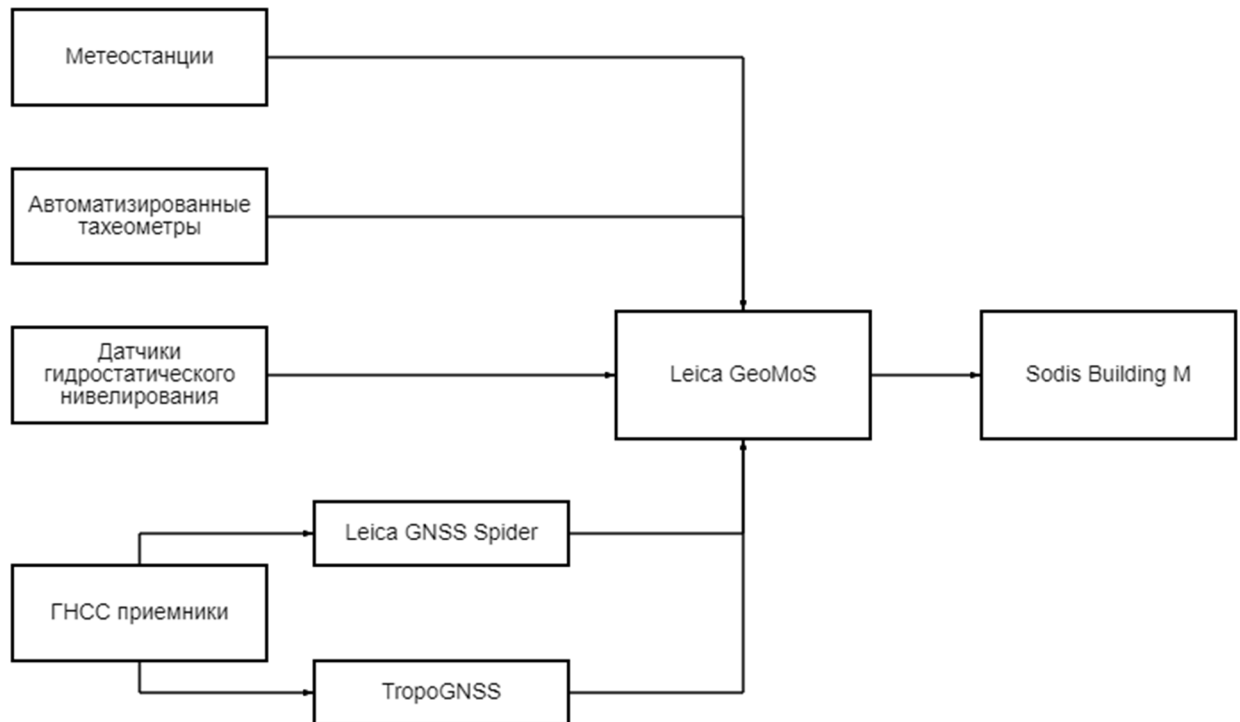


Рисунок 4.6 – Схема аппаратно-программного комплекса автоматизированной системы геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2

В качестве программного продукта для вычисления координат и высот опорных пунктов и станций тахеометров по методу PPP используется программа TropoGNSS [80]. Полученные результаты анализа положения опорных пунктов и станций тахеометров поступают 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 инъектирования.

4.2.2 Обоснование точности геодезического мониторинга здания Загорской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания

По предварительным расчетам за один этап инъекций величина подъема здания ГАЭС должна составить 50 мм. Переходя от величины подъема, то есть предельной ошибки, к среднеквадратической ошибке при доверительной вероятности $P = 0,997$, получим требуемую точность валидации подъема здания, равную 16,7 мм.

Учитывая состав и структуру системы геодезического мониторинга здания Загорской ГАЭС-2 и основываясь на принципе равного влияния погрешностей геодезических измерений [2, 38], рассчитаем суммарную погрешность определения высотного положения конструкций здания, используя следующую формулу:

$$m_{\text{верт}} = \sqrt{m_{\text{триг}}^2 + m_{\text{max}}^2}, \quad (4.1)$$

где $m_{\text{триг}}$ – средняя квадратическая погрешность измерения вертикального смещения тригонометрическим нивелированием;

m_{max} – средняя квадратическая погрешность определения высоты станции тахеометра.

Средняя квадратическая погрешность измерения вертикального смещения тригонометрическим нивелированием определяется по формуле [26]:

$$m_{\text{триг}} = \sqrt{2(m_{\text{лин}}^2 \operatorname{ctg}^2 Z + \frac{S^2 m_{\text{уг}}^2}{\rho^2 \sin^4 Z})}, \quad (4.2)$$

где S – горизонтальное проложение;

Z – зенитное расстояние;

$m_{\text{уг}}$ – средняя квадратическая погрешность измерения зенитного расстояния;

$m_{\text{лин}}$ – средняя квадратическая погрешность измерения горизонтального проложения.

Принимая $S = 150$ м и $Z = 88^\circ$, а также с учетом ошибок измерений углов $m_{\text{уг}} = 0,5''$ и расстояний $m_{\text{лин}} = 0,75$ мм тахеометром Leica TM50I средняя квадратическая погрешность определения вертикального смещения составит $m_{\text{триг}} = 0,5$ мм.

Средняя квадратическая погрешность определения высоты станции тахеометра из тригонометрического нивелирования рассчитывается с использованием следующей формулы:

$$m_{\text{тах}} = \sqrt{m_{\text{опор}}^2 + m_{\text{исх}}^2}, \quad (4.3)$$

где $m_{\text{опор}}$ – средняя квадратическая погрешность высоты опорного пункта, полученная высокоточным геометрическим нивелированием II класса, данная величина составляет 0,5 мм;

$m_{\text{исх}}$ – средняя квадратическая погрешность передачи высоты тригонометрическим нивелированием от трех опорных пунктов на станцию тахеометра при максимальном расстоянии до пунктов 1 км. Принимая $S = 1000$ м, $Z = 88^\circ$, СКП измерения зенитного расстояния $m_{\text{уг}} = 0,5''$ и СКП измерения расстояний $m_{\text{лин}} = 1,6$ мм по формуле расчета СКП тригонометрического нивелирования (4.2) получаем $m_{\text{исх}} = 3,7$ мм.

Подставив полученные величины в формулу (4.1), получим суммарную погрешность определения высотного положения конструкций здания, которая будет равна 3,7 мм. Переходя от среднеквадратических ошибок к предельным ошибкам

при доверительной вероятности $P = 0,997$, получим предельную ошибку определения отклонения перекрытия здания от горизонтального положения, которая будет равна:

$$m_{\text{пред}} = 3m_{\text{верт}} = 11,2 \text{ мм.} \quad (4.4)$$

Таким образом, предельная ошибка определения отклонения перекрытия здания Загорской ГАЭС-2 от горизонтального положения в системе геодезического мониторинга составляет 11,2 мм, что существенно меньше допустимой величины отклонения 50 мм.

Приведенный выше расчет точности выполнен при условии определения положения станций тахеометров по методу обратной линейно-угловой засечки на три опорных пункта, расположенный на удалении 1 км от тахеометра.

Дополнительно был выполнен предрасчет точности определения высотного положения плиты перекрытия здания ГАЭС в программном комплексе МГСети [25, 29, 30], используя реальные параметры сети реализованной автоматизированной системы геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2 с учетом видимости на пункты.

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

На рисунке 4.8 приведены технические характеристики автоматизированного тахеометра Leica TM50I, которым производятся измерения в системе.

Результаты предрасчета точности линейно-угловых измерений в автоматизированной системе геодезического мониторинга по предлагаемой схеме приведены на рисунке 4.9.

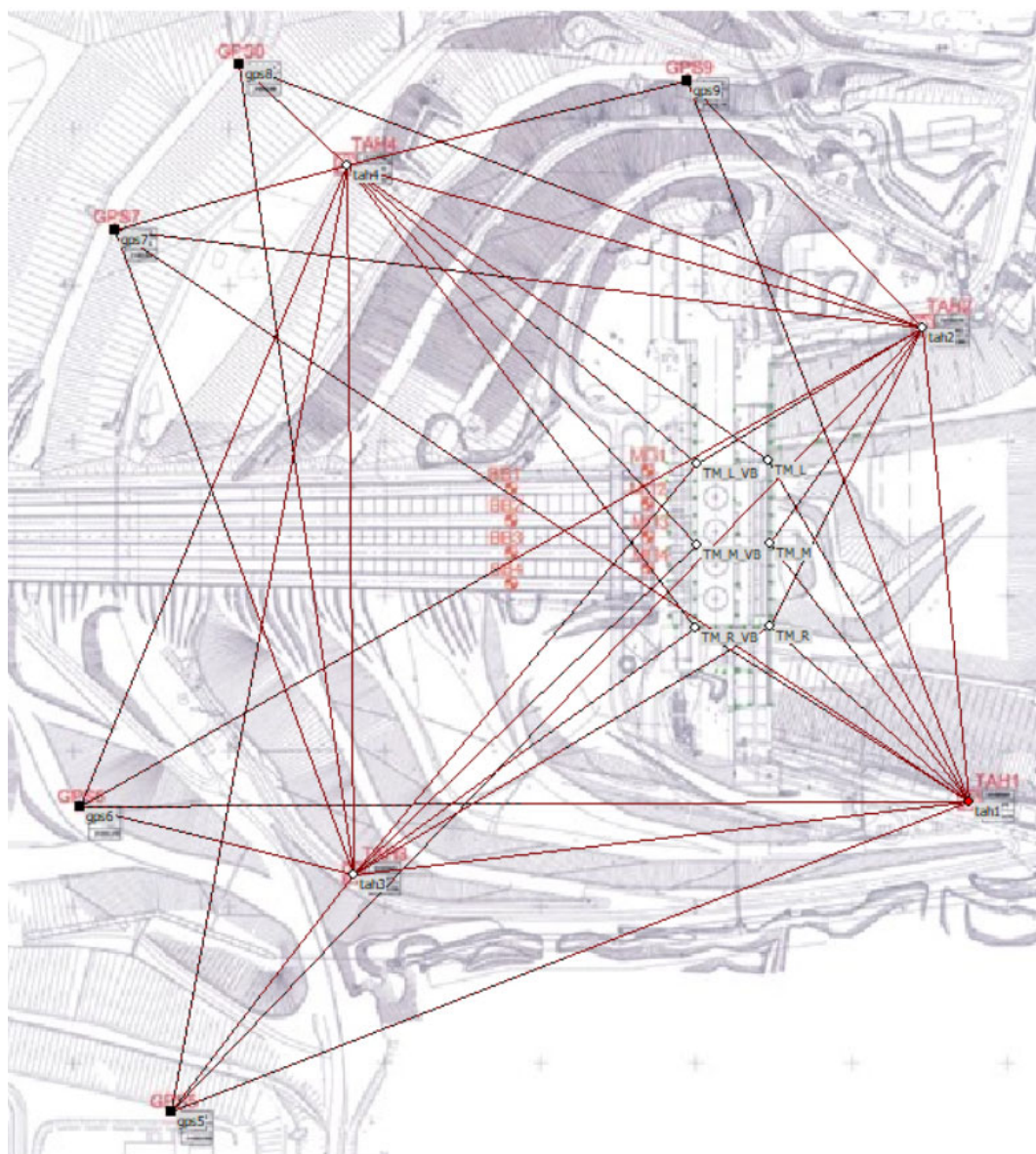


Рисунок 4.7 – Схема линейно-угловых измерений, реализованная в автоматизированной системе геодезического мониторинга Загорской ГАЭС-2

$m_{\alpha} = 0.5$	С.К.О. измерения горизонтального угла (")
$m_{\beta} = 0.5$	С.К.О. измерения вертикального угла (")
$m_d = 0.6$	С.К.О. измерения длины (мм) 1 ppm (мм/км)
$m_i = 0$	С.К.О. измерения высоты инструмента (мм)
$m_v = 0$	С.К.О. измерения высоты визирования (мм)
$\mu_h = 0.2424$	ошибка единицы веса превышения, мм

Рисунок 4.8 – Технические характеристики тахеометра Leica TM50I в проекте предрасчета точности

№	Имя точки	Сред. квадрат. ошибки			
		Mx	My	Mz	
1	tah4	0.0003	0.0003	0.0001	
2	tah2	0.0006	0.0004	0.0002	
3	tah3	0.0004	0.0004	0.0001	
4	tah1	0.0006	0.0005	0.0002	
5	gps7				план./высот.
6	gps8				план./высот.
7	gps9				план./высот.
8	gps6				план./высот.
9	gps5				план./высот.
10	TM_R	0.0006	0.0006	0.0002	
11	TM_L	0.0008	0.0008	0.0003	
12	TM_M	0.0007	0.0006	0.0003	
13	TM_L_VB	0.0006	0.0006	0.0002	
14	TM_M_VB	0.0009	0.0008	0.0003	
15	TM_R_VB	0.0007	0.0006	0.0002	
Средняя квадратическая ошибка единицы веса плановой сети : 0.5сек.					
Средняя квадратическая ошибка единицы веса высотной сети : 0.2мм					

Рисунок 4.9 – Результаты предрасчета точности в программе МГСети

Предрасчет точности линейно-угловых измерений в системе автоматизированного мониторинга по программе МГСети показал, что в реализованной автоматизированной системе точность определения высотного положения характеризуется величиной равной 0,2 мм, а планового – 0,1 мм.

4.2.3 Результаты апробации методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания на Загорской ГАЭС-2

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 подъем МТ41 составил 90 мм, а МТ62 – 91 мм (рисунок 4.10).

Для контроля результатов мониторинга вертикальных перемещений, полученных по наблюдениям автоматизированных тахеометров, использовались данные

гидростатического нивелирования за период с 20.04.2022 по 02.06.2022. Результаты мониторинга с применением датчиков гидростатического нивелирования приводятся в системе относительно датчика DGN1 (рисунок 4.11).

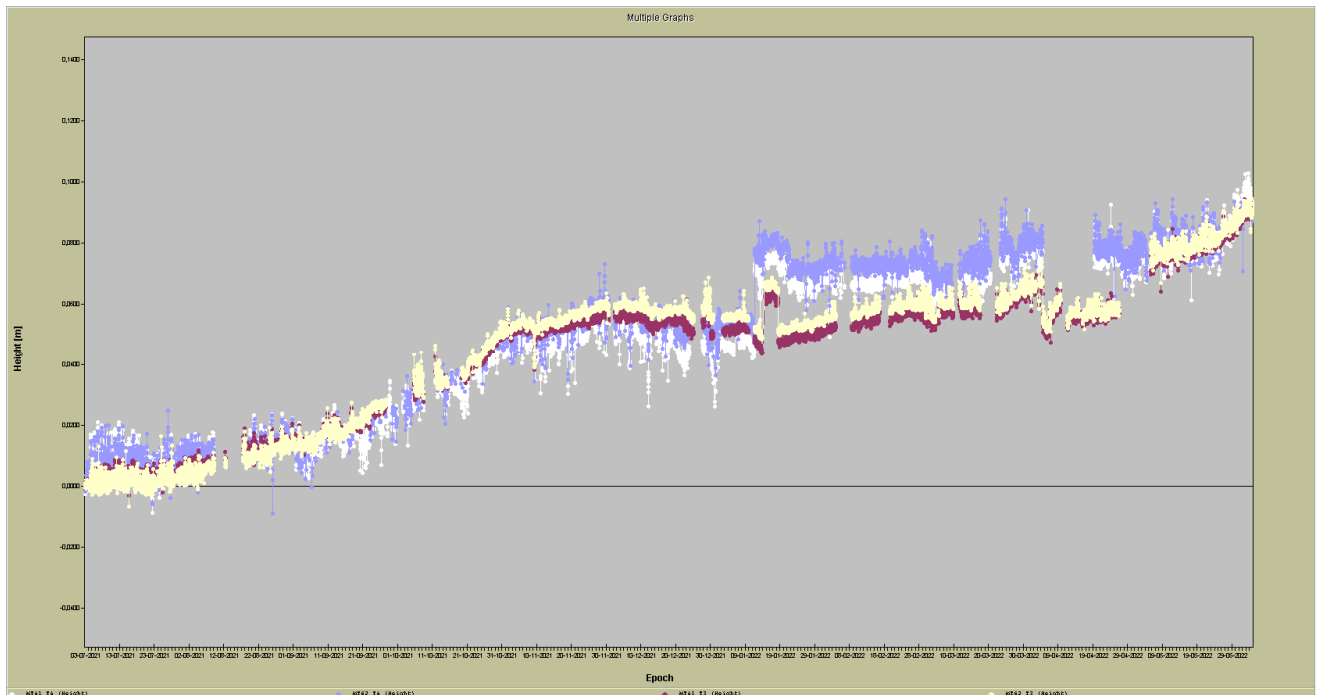


Рисунок 4.10 – График вертикальных перемещений марок МТ41 и МТ62 с тахеометров № 3 и № 4 на здании станционного узла Загорской ГАЭС-2 с 03.07.2021 по 02.06.2022

За период с 20.04.2022 по 02.06.2022 по данным автоматизированных тахеометров подъем марки МТ3, расположенной на углу здания на отм. 166,40 м составил 11 мм. Перемещение же ближайшего к указанной марке датчика гидростатического нивелирования DGN10 относительно базового DGN1 составило за исследуемый период 7 мм. Разница суммарных перемещений составила 4 мм.

Дополнительно контроль результатов мониторинга автоматизированными тахеометрами проводился по бетонным маркам с периодичностью один цикл в месяц с помощью нивелирования II класса. Схема размещения марок поверхностных бетонных, по которым ведутся наблюдения методом нивелирования по программе II класса, и расположенных рядом марок автоматизированной системы геодезического мониторинга представлено на рисунке 4.12.

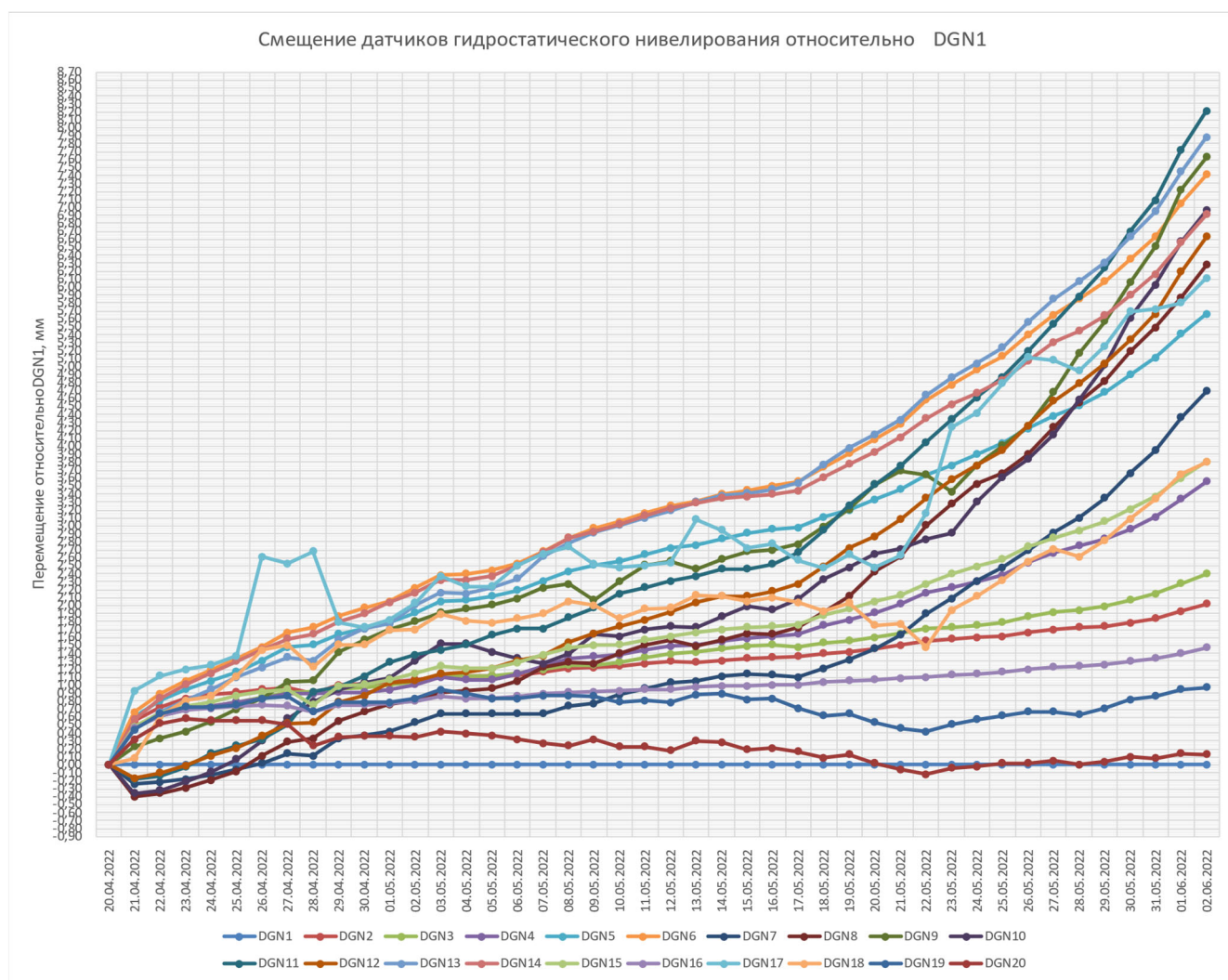


Рисунок. 4.11 – График вертикальных перемещений датчиков гидростатического нивелирования на отм. 125,10 здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 с 20.04.2022 по 02.06.2022

В таблице 4.3 представлен расчет суммарных величин вертикальных перемещений марок поверхностных бетонных (ЗМБ.26-29, ЗМБ.31, ЗМБ.33, ЗМБ.35), установленных на отм. 166,40 м (перекрытие здания), и расположенных рядом марок автоматизированной системы геодезического мониторинга (МТ4, МТ6, МТ8, МТ10, МТ12, МТ31, МТ32).

Разность суммарных перемещений марок поверхностных бетонных и марок автоматизированной системы геодезического мониторинга не превышает 3 мм. Исходя из этого, можно сделать следующий вывод, предложенная методика позволяет выполнять мониторинг высотного положения здания станционного узла За-

горской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания с требуемой для этого точностью.

Таблица 4.3 – Разница суммарных вертикальных перемещения марок поверхностных бетонных и марок автоматизированной системы

Номера марок	Разница суммарных смещений, мм
MT31 – ЗМБ.26	+2
MT4 – ЗМБ.27	+1
MT32 – ЗМБ.28	0
MT6 – ЗМБ.29	+1
MT8 – ЗМБ.31	+2
MT10 – ЗМБ.33	+3
MT12 – ЗМБ.35	+2
MT63 – ЗМБ.104	+1
MT65 – ЗМБ.103	-3
MT67 – ЗМБ.102	0
MT70 – ЗМБ.101	-1

4.3 Выводы по четвертому разделу

Для контроля пространственного положения сооружений станционного узла Загорской ГАЭС-2 в процессе подъема здания ГАЭС разработана методика геодезического мониторинга с применением автоматизированных тахеометров, ГНСС-приемников, а также датчиков гидростатического нивелирования. Приводятся блок-схема и описание предлагаемой методики.

Исходя из требований к точности результатов мониторинга и учитывая специфику сооружений, определены структура и состав автоматизированной системы геодезического мониторинга, схема размещения автоматизируемой КИА, а также схема аппаратно-программного комплекса АСГМ.

Для подтверждения соответствия выбранного метода и схемы наблюдений за пространственным положением здания Загорской ГАЭС-2 требованиям точности валидации подъема проведен расчет точности определения высотного положения конструкций, получены суммарная и предельная погрешности, равные 3,7 мм и 11,2 мм, соответственно. Дополнительно проведен предрасчет точности результатов линейно-угловых измерений с использованием программного комплекса МГСети. Полученная точность определения высотного положения сооружения характеризуется величиной равной 0,2 мм, а планового – 0,1 мм.

Проведена апробация методики автоматизированного мониторинга на опытном участке и при подъеме здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания. Результаты апробации показали применимость методики для контроля пространственного положения конструкций здания станционного узла с требуемой точностью. Полученные с помощью автоматизированных тахеометров результаты были проверены в сравнении с данными системы гидростатического нивелирования, обладающей более высокой точностью, разница суммарных перемещений за период сравнения составила 4 мм.

Кроме этого, проведен контроль результатов автоматизированного мониторинга по данным нивелирования II класса, разность суммарных вертикальных смещений марок, определенных двумя методами, составила 3 мм.

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 Precise Point Positioning (PPP) в деформационном 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.

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.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АРМ – автоматизированное рабочее место;

АСГМ – автоматизированная система геодезического мониторинга;

АСДК – автоматизированная система диагностики и контроля;

АСО – автоматизированная система опроса;

ВМП – временная монтажная площадка;

ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция;

ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система;

ГТС – гидротехническое сооружение;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ЗМБ – марка поверхностная бетонная;

ИДС – информационно-диагностическая система;

КИА – контрольно-измерительная аппаратура;

КС – компенсаторная секция водовода;

КСБ – комплексная система безопасности;

КРУЭ – комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией;

ЛВ – верховая левобережная подпорная стена;

МКЭ – метод конечных элементов;

МНК – метод наименьших квадратов;

МП – монтажная площадка;

МТ – марка автоматизированного тахеометра;

НАБ – нижний аккумулирующий бассейн;

НДС – напряженно-деформируемое состояние;

НПУ ВВ – номинальный подпорный уровень верхнего бьефа;

ОУ – опытный участок;

ПВ – верховая правобережная подпорная стена;

ПГС – песчано-грунтовая смесь;

ПО – программное обеспечение;

ПС – подпорная стена;

СКП – среднеквадратическая погрешность;

СП – свод правил;

СПК – служебный производственный комплекс;

ССГМ – система спутникового геодезического мониторинга;

СШГЭС – Саяно-Шушенская ГЭС;

ТПС – техноприродная система;

ФПУ ВВ – фактический подпорный уровень верхнего бьефа;

УВВ – уровень верхнего бьефа;

УМО – уровень мертвого объема;

УНБ – уровень нижнего бьефа;

GPS – Global Positioning System;

HS – Hardening Soil;

IERS – Международная служба вращения Земли;

LoS – Line-of-Sight;

PDOP – Positional Dilution Of Precision;

PPP – Precise Point Positioning.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Антонович, К. М. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий / К. М. Антонович, А. П. Карпик. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 1. – С. 53–67.
- 2 Афонин, Д. А. Предрасчет точности геодезических измерений при организации мониторинга деформаций порталных частей транспортных тоннелей / Д. А. Афонин, Н. Н. Богомолова, М. Я. Брынь. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2014. – № 1. – С. 7–11.
- 3 Бернд, Х. Автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ) на Саяно-Шушенской ГЭС / Х. Бернд, И. В. Сухов, В. Т. Ли. – Текст : непосредственный // Гидротехника. – 2015. – № 2. – С. 12–15.
- 4 Бернд, Х. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга / Х. Бернд, Х. К. Ямбаев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.
- 5 БИНГ-3. Информационно-диагностическая система по контролю безопасности сооружений. – URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/water/damsafety/regional_dam_safety_meeting_1-2_March_2017_in_Almaty/2_March/BING.pdf. – Текст : электронный.
- 6 Брызгалов, В. И. Гидроэлектростанции : учебное пособие / В. И. Брызгалов, Л. А. Гордон. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2002. – 541 с. – Текст : непосредственный.
- 7 Вульфович, Н. А. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС. Оценка технического состояния по данным натурных наблюдений / Н. А. Вульфович, Л. А. Гордон, Н. И. Стефаненко. – Санкт-Петербург : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2012. – 210 с. – Текст : непосредственный.
- 8 Геодезические методы исследования деформаций сооружений / А. К. Зайцев [и др.]. – Москва : Недра. – 1991. – 271 с. – Текст : непосредственный.
- 9 Гидротехнические сооружения. Часть 1 : учебник для вузов / Л. Н. Рассказов [и др.]. – Издание второе, исправленное и дополненное. – Москва : Издательство АСВ, 2011. – 576 с. – ISBN 978-5-93093-593-6. – Текст : непосредственный.

10 ГКИНП (ГНТА)-03-010–03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – Москва : ЦНИИГАиК, 2004. – 244 с. – Текст : непосредственный.

11 ГКИНП (ОНТА)-01-271–03. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. – Москва : ЦНИИГАиК, 2003. – 182 с. – Текст : непосредственный.

12 Градостроительный кодекс Российской Федерации : федеральный закон от 29.12.2004 № 190. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/. – Текст : электронный.

13 Гуляев, Ю. П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений : монография / Ю. П. Гуляев. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с. – ISBN 978-5-87693-290-7. – Текст : непосредственный.

14 Зерцалов, М. Г. Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений / М. Г. Зерцалов, А. Н. Симутин, А. В. Александров. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2015. – № 6. – С. 32–40.

15 Калинин, В. В. Влияние атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания станционного 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.

16 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.

17 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.

18 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.

19 Карлсон, А. А. Измерение деформаций гидротехнических сооружений / А. А. Карлсон. – Москва : Недра, 1984. – 245 с. – Текст : непосредственный.

20 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.

21 Косарев, Н. С. Усовершенствованная методика контроля фазовых ГНСС-измерений по эфемеридам спутников и приближенным координатам пункта наблюдений / Н. С. Косарев, С. О. Шевчук, Е. С. Черемисина. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63. № 6. – С. 611–622.

22 Левачев, С. Н. Развитие системы мониторинга безопасности на гидротехнических сооружениях канала имени Москвы. – Текст : непосредственный / С. Н. Левачев, Т. С. Федорова // Вестник МГСУ. – 2015. – № 5. – С. 73–85. – DOI 10.22227/1997-0935.2015.5.73-85.

23 Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы / А. В. Александров [и др.]. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 7. – С. 2–10.

24 Липатников, Л. А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования с использованием глобальных навигационных спутниковых систем : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 25.00.32 / Липатников Леонид Алексеевич. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 144 с. – Текст : непосредственный.

25 Магистральная сеть : официальный сайт. – URL: <http://mgseti.ru>. – Текст : электронный.

26 МДС 13-22.2009. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений. – Москва : ОАО «ЦПП», 2010. – 76 с. – Текст : непосредственный.

27 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.

28 Михелев, Д. Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений / Д. Ш. Михелев, И. В. Рунов, А. И. Голубцов. – Москва : Недра, 1977. – 151 с. – Текст : непосредственный.

29 Могильный, С. Г. Принципы построения и уравнивания опорных подземных маркшейдерских сетей / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Середович. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование – 2015. – № 6 (80). – С. 51–56.

30 Могильный, С. Г. Программный комплекс для подземных маркшейдерских сетей / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий. – Текст : непосредственный // Уголь Украины. – 2011. – № 5. – С. 17–22.

31 Мусюрка, А. В. Автоматизированная система диагностического контроля гидротехнических сооружений Бурейской гидроэлектростанции / А. В. Мусюрка. – Текст : непосредственный // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : сборник трудов восьмой Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 503–507.

32 Никитин, А. В. Геодезический контроль строительства опор мостов / А. В. Никитин. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 70–80.

33 Никитин, А. В. Способ определения крена сооружений цилиндрической формы / А. В. Никитин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2002. – № 7. – С. 15–17.

34 Николаев, С. А. Статистические исследования осадок инженерных сооружений / С. А. Николаев. – Москва : Недра, 1983. – 112 с. – Текст : непосредственный.

35 О безопасности гидротехнических сооружений : федеральный закон от 21.07.1997 № 118-ФЗ. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/. – Текст : электронный.

36 О декларировании безопасности гидротехнических сооружений: постановление Правительства РФ от 20.11.2020 № 1892. – URL: <https://base.garant.ru/74944089/>. – Текст : электронный.

37 О классификации гидротехнических сооружений : постановление Правительства Российской Федерации от 02.11.2013 № 986. – URL: <https://base.garant.ru/70495114/>. – Текст : электронный.

38 Падве, В. А. Математическая обработка и анализ результатов геодезических измерений. Часть 1. Основы теории погрешностей измерений и фундаментальные алгоритмы точностной МНК-оптимизации результатов измерений: монография / В. А. Падве. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 162 с. – ISBN 978-5-87693-836-7. – Текст : непосредственный.

39 Петров, С. В. Опасные ситуации техногенного характера и защита от них : учебное пособие / С. В. Петров, В. А. Макашев. – Москва : ЭНАС, 2008. – 224 с. – ISBN 978-5-93196-920-6. – Текст : непосредственный.

40 Применение современных автоматизированных геодезических приборов для мониторинга гидротехнических сооружений ГЭС / В. Г. Сальников, В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 108–124.

41 Программа восстановления и ввода в эксплуатацию Загорской ГАЭС-2. 1938-40-001. – Москва : ОАО «Институт Гидропроект», 2013. – 39 с. – Текст : непосредственный.

42 Проектная документация «Корректировка ТЭО (проект) строительства Загорской ГАЭС-2 на р. Кунье». – Москва : ОАО «Институт Гидропроект», 2015. – 144 с. – Текст : непосредственный.

43 Регламент специальных наблюдений за пространственным положением ГТС в период выравнивания здания станционного узла Загорской ГАЭС-2. 1938-

40-544.3. – Москва : АО «Институт Гидропроект», 2021. – 68 с. – Текст : непосредственный.

44 Сердаков, Л. Е. Геодезическое сопровождение на этапах сборки и эксплуатации модернизируемого источника синхротронного излучения ESRF / Л. Е. Сердаков, Д. Мартин, П. П. Мурзинцев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2018. – № 11. – С. 2–8.

45 Сердаков, Л. Е. Об оптимизации опорных геодезических кольцевых сетей ускорителей при использовании лазерных трекеров / Л. Е. Сердаков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2017. – № 5. – С. 2–6.

46 Скрипников, В. А. Прикладная геодезия. Геодезические работы при определении осадок инженерных сооружений автоматизированными системами и приборами : учебное пособие / В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 106 с. – ISBN 978-5-906948-10-6. – Текст : непосредственный.

47 СНиП II-7–81*. Строительство в сейсмических районах. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854805.pdf>. – Текст : электронный.

48 СО 153-34.20.501–2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/40/40609/index.htm>. – Текст : электронный.

49 СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293793/4293793649.pdf>. – Текст : электронный.

50 СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05–84* (с изменениями № 1, 2, 3). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095521>. – Текст : электронный.

51 СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01–2003 (с Изменением № 1). – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293793/4293793668.pdf>. – Текст : электронный.

52 СТО 70238424.27.140.032–2009. Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью. Геодинамический мониторинг гидротехнических со-

оружений. Нормы и требования. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293806/4293806976.htm>. – Текст : электронный.

53 СТО 70238424.27.140.035–2009. Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293806/4293806973.htm>. – Текст : электронный.

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

55 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.

56 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.

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

58 Шаинян, Г. А. Рациональное размещение прямых отвесов в бетонных плотинах / Г. А. Шаинян. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14. Вып. 6. – С. 713–721. – DOI 10.22227/1997-0935.2019.6.713-721.

59 Шляхтина, Т. Ф. Организация системы мониторинга Братской ГЭС / Т. Ф. Шляхтина, Е. Л. Ким. – Текст : непосредственный // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2015. – Т. 1. – С. 248–254.

60 Шоломицкий, А. А. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.

61 Ямбаев, Х. К. Геодезический контроль прямолинейности и соосности в строительстве / Х. К. Ямбаев. – Москва : Недра, 1986. – 264 с. – Текст : непосредственный.

62 1 Hz GPS satellites clock correction estimations to support high-rate dynamic PPP GPS applied on the Severn suspension bridge for deflection detection / Tang X. [et al.]. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2019. – Vol. 23. – P. 1–12.

63 A reference station-based GNSS computing mode to support unified precise point positioning and real-time kinematic services / Y. Feng [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2013. – Vol. 87. – P. 945–960.

64 Application of GNSS technology in geodetic auscultation of embankment dams. – URL: http://balgeos.cc.bas.bg/News/materials/Presentations/present_Viena_2010/11_Bogdanovski_Application_GNSS_techcnology.pdf. – Текст : электронный.

65 Bernese GPS Software Version 5.0 / Edited by U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez. – Astronomical Institute University of Bern, 2006. – 110 p. – Текст : непосредственный.

66 Bond, J. A Study of the Use of GPS Sensors for Structural Monitoring of the Mactaquac Dam / J. Bond, D. Kim, J. A Fletcher // In 5th Canadian conference on geotechnique and natural hazards. – Kelowna, Canada, 2011. – 40 p. – Текст : непосредственный.

67 Deformation monitoring studies at Atatürk dam. – URL: http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/fs01d%5Cfs01d_kalkan_alkan_et_al_4466.pdf. – Текст : электронный.

68 Earth orientation data. – URL: https://www.iers.org/IERS/EN/Data_Products/EarthOrientationData/eop.html. – Текст : электронный.

69 Effect of recent revisions of the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions / C. DeMets [et al.]. – Текст : непосредственный // *Geophys. Res. Lett.* – 1994. – Vol. 21, № 20. – P. 2191–2194.

70 Ehigiator, M. O. Establishment of geodetic control in Jebba Dam using CSRS-PPP processing software / M. O. Ehigiator, R. Ehigiator-Irughe, S. A. Uzoekwe. – Текст : непосредственный // *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences.* – 2011. – Vol. 2. – P. 763–769.

71 Ehiorobo, J. O. Evaluation of absolute displacement of geodetic control for dam deformation monitoring using CSRS-PPP Model / J. O. Ehiorobo, R. Ehigiator-Irughe. – Текст : непосредственный // *Journal of Earth Science and Engineering.* – 2012. – Vol. 2. – P. 277–286.

72 Ehiorobo, J. O. Monitoring for horizontal movement in an Earth dam using differential GPS / J. O. Ehiorobo, R. Irughe-Ehigiator. – Текст : непосредственный // *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS).* – 2011. – № 2 (6). – P. 908–913.

73 Erol, S. Evaluation of high-precision sensors in structural monitoring / S. Erol. – Текст : непосредственный // *Sensors.* – 2010. – Vol. 10. – P. 10803–10827. – DOI 10.3390/s101210803.

74 Evaluation of crack displacement in underground excavations using wireless technology crack meters. – URL: https://www.researchgate.net/publication/320550618_Evaluation_of_crack_displacement_in_underground_excavations_using_wireless_technology_crack_meters. – Текст : электронный.

75 GNSS satellite geometry and attitude models / O. Montenbruck [et al.]. – Текст : непосредственный // *Advances in Space Research.* – 2015. – Vol. 56. – P. 1015–1029.

76 Guidelines for instrumentation of large dams. – URL: https://www.researchgate.net/publication/321299610_Guidelines_for_Instrumentation_of_Large_Dams. – Текст : электронный.

77 Guochang, X. GPS: Theory, Algorithms and Applications / X. Guochang. – Berlin, Springer, 2007. – 353 p. – Текст : непосредственный.

78 High accuracy real-time dam monitoring using low-cost GPS equipment. – URL: http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts_43/ts43_05_ali_etal.pdf. – Текст : электронный.

79 IERS Conventions / D. D. McCarthy, G. Petit (eds.). – Frankfurt and Main : Central Bureau of IERS, 2010. – 179 p. – Текст : непосредственный.

80 Kalinnikov, V. V. Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga–Ural region of Russia / V. V. Kalinnikov, O. G. Khutorova. – Текст : непосредственный // Ann. Geophys. – 2017. – Vol. 35. – P. 453–464.

81 Kenneth, W. H. Continuous GPS monitoring of structural deformation at Pacoima Dam, California / W. H. Kenneth, A. B. Jeffrey. – Текст : непосредственный // Seismological Research Letters. – 1998. – Vol. 69, No. 4. – P. 299–308.

82 Kouba, J. Precise point positioning using IGS orbit and clock products / J. Kouba, P. Héroux. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2001. – Vol. 5, No. 2. – P. 12–28.

83 Kulkarni, M. N. Deformation studies of Koyna Dam, Western India, using GPS / M. N. Kulkarni, N. Radhakrishnan, D. Rai. – Текст : непосредственный // GPS World. – 2004. – November 15(11). – P. 14–19.

84 Lujan, R. Implementation of PPP as new GNSS observation type in the geomonitoring system GOCA / R. Lujan. – University of Applied Science, 2019. – 173 p. – Текст : непосредственный.

85 Monitoring structural deformation at Pacoima Dam, California Using Continuous GPS. – URL: https://www.researchgate.net/publication/252210598_Monitoring_Structural_Deformation_at_Pacoima_Dam_California_Using_Continuous_GPS/link/0deec52b332655e6000000000/download. – Текст : электронный.

86 NASA International Mass Loading Service. – URL: <http://massloading.net/>. – Текст : электронный.

87 Ocean tide loading provider. – URL: <http://holt.oso.chalmers.se/loading>. – Текст : электронный.

88 Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn suspension bridge, UK / X. Tang, G. W. Roberts, X. Li, C. M. Hancock. – Текст : непосредственный // Adv Space Res. – 2017. – Vol. 60 (5). – P. 925–937.

89 Roberts, G. W. Measurement and correlation of displacements on the Severn Suspension Bridge using GPS / G. W. Roberts, X. Tang, C. J. Brown. – Текст : непосредственный // Appl. Geomat. – 2019. – Vol. 11. – P. 161–176.

90 RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. – URL: http://www.rtklib.com/prog/rtklib_2.4.2.zip. – Текст : электронный.

91 Suspension Cable Bridge Deflection Determination Using Kinematic PPP with High-Rate GPS Satellite Clock Corrections / Tang X. [et al.]. – Текст : непосредственный // China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings: Volume I. – 2020. – P. 222–231.

92 Tang, X. Differenced measurements between satellites applied on RTK PPP for structure monitoring / X. Tang, X. Li. – Текст : непосредственный // China satellite navigation conference (CSNC). Proceedings: Volume 1. – 2017. – P. 277–284.

93 Yi, T. H. Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge / T. H. Yi, H. N. Li, M. Gu. – Текст : непосредственный // Measurement. – 2013. – Vol. 46 (1). – P. 420–432.

94 Yigit, C. O. Experimental assessment of post-processed kinematic precise point positioning method for structural health monitoring / C. O. Yigit. – Текст : непосредственный // Geomatics Nat. Hazards Risk. – 2016. – Vol. 7. – P. 360–383.

95 Yigit, C. O. Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures / C. O. Yigit, E. Gurlek. – Текст : непосредственный // Geomatics Nat. Hazards Risk, 2017. Vol. 8 (2). – P. 893–904.

96 Zumberge, J. F. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks / J. F. Zumberge [et al.]. – Текст : непосредственный // JGR-Solid Earth. – 1997. – Vol. 102. – P. 5005–5017.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

АКТ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС АО «ИНСТИТУТ
ГИДРОПРОЕКТ»

Акционерное общество "Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" имени С.Я. Жука" (АО "Институт Гидропроект")

СПРАВКА
о внедрении

Настоящим удостоверяется, что результаты научных исследований Устинова Александра Валерьевича (касающиеся методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания) внедрены в проектную документацию «Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Разработка проектной документации на восстановительные работы. Корректировка этапа 1. Этап 2. Научно-техническое сопровождение работ» и в рабочую документацию, которая была разработана в 2017-2021 гг. при непосредственном участии Устинова А.В.

Результаты исследований внедрены в производственный процесс АО «Институт Гидропроект» в рамках выполнения работ по восстановлению Загорской ГАЭС-2.

Генеральный директор АО «Институт Гидропроект»,
доктор технических наук



Е.Н.Беллендир

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС АВТОНОМНОЙ
НЕКОММЕРЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УНИВЕРСИТЕТ ИННОПОЛИС»



АНО ВО «Университет Иннополис»
420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д.1
university@innopolis.ru; university.innopolis.ru
ОКПО 26762136; ОГРН 1121600006142;
ИНН/КПП 1655258235/161501001
+7 (843) 203-92-53

АКТ
о внедрении

Устиновым А.В. в рамках диссертационного исследования «Разработка методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания (на примере здания Загорской ГАЭС-2)», проведенного в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», была разработана методика геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс АНО ВО «Университет Иннополис», а именно в образовательные программы повышения квалификации для управленцев и команд CDO-менеджеров(программа «Управление, основанное на данных»), а также в программы повышения квалификации для профессорско-преподавательского состава вузов РФ по отрасли Добывающая промышленность.

Директор института дополнительного образования



М.Н. Образцова