

На правах рукописи

Горилько Александр Сергеевич



Разработка методики выполнения высокоточных  
инженерно-геодезических измерений на техногенных геодинамических  
полигонах особо опасных и технически сложных инженерных сооружений

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2026

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Уставич Георгий Афанасьевич.

Официальные оппоненты:

Соловицкий Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», профессор кафедры геологии и географии;

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

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (г. Москва).

Защита состоится 13 октября 2026 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»:

<https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/gorilko-aleksandr-sergeevich/>

Автореферат разослан 25 июня 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 25.05.2026.

Формат 60 × 84 1/16. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 87.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* Возведение промышленных и гражданских зданий и сооружений требует проведения соответствующих инженерно-геодезических работ на всех этапах производства комплекса строительно-монтажных работ. От их своевременного и качественного выполнения в значительной степени зависят сроки проведения работ, следовательно, и долговечность эксплуатации инженерных сооружений, включая особо опасные и технически сложные, к которым относятся ускорители заряженных частиц, атомные и гидроэлектростанции (АЭС и ГЭС и др.) Для обеспечения безопасного строительства и эксплуатации подобных инженерных сооружений на их промышленных площадках создаются техногенные геодинамические полигоны (ТГП).

Согласно существующей нормативно-технической документации, к обеспечению необходимой точности выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений предъявляются повышенные требования как на стадии строительства, так и эксплуатации таких инженерных сооружений.

К настоящему времени в технической литературе и нормативных документах достаточно хорошо освещены вопросы производства высокоточных инженерно-геодезических измерений на промышленных площадках различных сооружений. Однако, особенно в условиях сейсмической активности территории и обеспечения единого координатного пространства для последующего деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, требуется проведение дальнейших исследований, заключающихся в разработке и исследовании новых схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений, метрологической аттестации средств измерений и изучении влияния различных неблагоприятных природных факторов при производстве геодезических работ.

*Степень разработанности темы.* Разработкой и совершенствованием методик и технологических схем выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений для геодезического обеспечения процесса строительства и эксплуатации инженерных сооружений различного назначения, а также метрологической проверки применяемых геодезических средств измерений занимались такие ученые,

как Асташенков Г. Г., Брайт П. И., Бронштейн Г. С., Брынь М. Я., Буюкян С. П., Васютинский И. Ю., Ганьшин В. Н., Генике А. А., Жуков Б. Н., Зайцев А. К., Карлсон А. А., Карпик А. П., Кафтан В. И., Ключин Е. Б., Лебедев Н. Н., Левчук Г. П., Михелев Д. Ш., Мустафин М. Г., Новак В. Е., Ознамец В. В., Пискунов М. Е., Рязанцев Г. Е., Сердаков Л. Е., Соловицкий А. Н., Спиридонов А. И., Столбов Ю. В., Сучков О. П., Уставич Г. А., Федосеев Ю. Е., Хорошилов В. С., Шоломицкий А. А., Шторм В. В., Ямбаев Х. К. и многие другие.

*Целью исследований* является разработка методики производства высокоточных инженерно-геодезических измерений для создания ТГП и обеспечения единого координатного пространства для выполнения деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружений атомной промышленности.

*Основные задачи исследований:*

– выполнить информационно-аналитический обзор существующих методов, средств и технологических схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений, применяемых для определения деформационного состояния инженерных сооружений при их строительстве и эксплуатации;

– на основании современного уровня развития геодезического измерительного оборудования предложить методику производства высокоточных инженерно-геодезических измерений и выполнить исследования различных вариантов построения ТГП на территории АЭС и обеспечения единого координатного пространства для последующего проведения деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружениях атомной промышленности;

– выполнить исследование влияния неблагоприятных погодных условий (тумана) на точность производства высокоточных инженерно-геодезических измерений;

– разработать схему выполнения метрологической поверки электронных тахеометров непосредственно на промышленной площадке АЭС без применения эталонных линейных базисов;

– для проведения деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, расположенных на территории АЭС,

предложить и выполнить исследование различных схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений с установлением их совмещенной цикличности измерений при создании ТГП;

– выполнить апробацию разработанной методики производства высокоточных инженерно-геодезических измерений при построении ТГП и определении деформационного состояния особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, расположенных на территории АЭС.

*Объектом исследования* является геодезическое обеспечение строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе атомных электростанций, а также метрологическое обеспечение геодезических средств измерений.

*Предметом исследования* является разработка методики выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений при создании ТГП и обеспечении единого координатного пространства при проведении деформационного мониторинга земной поверхности и особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, расположенных на территории АЭС в процессе их строительства и эксплуатации.

*Научная новизна диссертационного исследования* заключается в следующем:

– разработана методика производства высокоточных инженерно-геодезических измерений, позволяющая построить ТГП и обеспечить единое координатное пространство для проведения деформационного мониторинга земной поверхности промышленной площадки АЭС и расположенных на ней особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, включая реакторное отделение;

– выполнено исследование влияния внешних негативных факторов (тумана) на точность результатов линейных измерений сторон ТГП электронными тахеометрами и определены области погодных условий их применения;

– для повышения точности и надежности измерения расстояний электронными тахеометрами разработана схема их метрологической поверки непосредственно на промышленной площадке АЭС методом сличения без использования эталонных линейных базисов.

*Теоретическая значимость* работы заключается в исследовании повышения точности выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений при

построении ТГП и обеспечении единого координатного пространства для проведения деформационного мониторинга земной поверхности промышленной площадки АЭС и расположенных на ней особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, включая реакторное отделение.

*Практическая значимость* работы заключается в возможности соответствующим структурным подразделениям использовать разработанную методику для проведения деформационного мониторинга технически сложных и особо опасных инженерных сооружений и при необходимости своевременно производить профилактические мероприятия по обеспечению их безопасной эксплуатации.

*Методология и методы исследования* заключаются в использовании теории математической обработки результатов геодезических измерений. Для обработки результатов измерений использовалось программное обеспечение КРЕДО ГНСС и КРЕДО ДАТ.

*Положения, выносимые на защиту:*

– разработанная методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений позволяет с заданной нормативной точностью построить ТГП и в едином координатном пространстве выполнить деформационный мониторинг земной поверхности, а также расположенных на промышленной площадке АЭС особо опасных и технически сложных инженерных сооружений при их строительстве и эксплуатации;

– результаты экспериментальных исследований влияния неблагоприятных погодных условий позволяют без снижения точности установить области выполнения линейных измерений электронными тахеометрами в соответствии с предложенной классификацией плотности тумана;

– предложенная схема метрологической поверки методом сличения без использования эталонных линейных базисов позволяет непосредственно на промышленной площадке АЭС выполнять метрологическую поверку электронных тахеометров.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Диссертация соответствует следующим областям исследования: 12 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных

и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений, в том числе с применением робототехники. Геодезический мониторинг устойчивости зданий и сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов; 15 – Геодезическая метрология. Разработка методов, средств и нормативных документов для метрологического обеспечения геодезических средств измерений. Создание и функционирование эталонных геодезических полигонов, базисов и компараторов для поверки, калибровки и аттестации геодезических средств измерений паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

*Степень достоверности и апробация результатов исследования.* Основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» в 2018–2025 гг.

*Публикации по теме диссертации.* Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 8 научных статьях, 3 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 182 страницы машинописного текста. *Диссертация* состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы, включающего 136 наименований, содержит 50 таблиц и 40 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Во введении* обосновывается актуальность темы исследований, формулируется цель и задачи этих исследований, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, устанавливается достоверность результатов исследования, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

*В первом разделе* приводится классификация объектов капитального строительства и требования к точности их возведения, особое внимание уделяется

особо опасным и технически сложным инженерным сооружениям. Рассматриваются способы производства высокоточных инженерно-геодезических измерений при создании ТГП с целью формирования единого координатного пространства для обеспечения строительства и деформационного мониторинга земной поверхности и инженерных сооружений. По итогам выполненного анализа существующих технологических схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений автором сформулирована актуальность рассматриваемой темы, цель и основные научно-технические задачи диссертационных исследований.

*Во втором разделе* выполнены теоретические и экспериментальные исследования по разработке методики и технологической схемы построения ТГП, с точки зрения точности определения координат пунктов техногенного полигона применительно к конкретному объекту – промышленной площадке под строительство новой АЭС, которая является ядерно-энергетическим комплексом, реализующим замкнутый ядерный топливный цикл на базе реакторов на быстрых нейтронах с реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем (рисунок 1). Данный проект реализуется мировым флагманом в области ядерной энергетики – госкорпорацией «Росатом».

В соответствии с действующими нормативно-правовыми документами на промышленных площадках для создания единого координатного пространства, необходимо проектировать, а затем строить ТГП с целью оперативного проведения деформационного мониторинга земной поверхности и расположенных на ней особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, например, таких как реакторные отделения АЭС.

Для решения этой научно-технической задачи была разработана технологическая схема производства высокоточных инженерно-геодезических работ на промышленной площадке АЭС (рисунок 2).



Рисунок 1 – Схема расположения объектов на промышленной площадке строящейся АЭС на быстрых нейтронах



Рисунок 2 – Предлагаемая технологическая схема выполнения инженерно-геодезических работ на техногенных геодинамических полигонах АЭС

Разработанная технологическая схема предусматривает реализацию следующих предлагаемых научно-методических принципов.

1 Пункты ТГП устанавливаются на устойчивом геологическом основании в местах, обеспечивающих их долговременную сохранность с учетом возможного наличия на промышленной площадке АЭС локальных тектонических разломов.

2 Независимо от проектируемых схем измерений между пунктами ТГП, по возможности, обеспечивается прямая оптическая видимость с учетом местоположения строительства новых инженерных сооружений АЭС, особенно для пунктов, расположенных в пределах локальных тектонических разломов.

3 Для исключения ошибок за центрирование средств измерений пункты ТГП обеспечиваются центрами для принудительного центрирования, обеспечивающими  $m_{\text{центр}}$  не грубее 0,10 мм.

4 Учитывая сложные условия выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений, метрологическая поверка электронных тахеометров выполняется непосредственно на промышленной площадке по разработанной схеме методом сличения без применения эталонных линейных базисов.

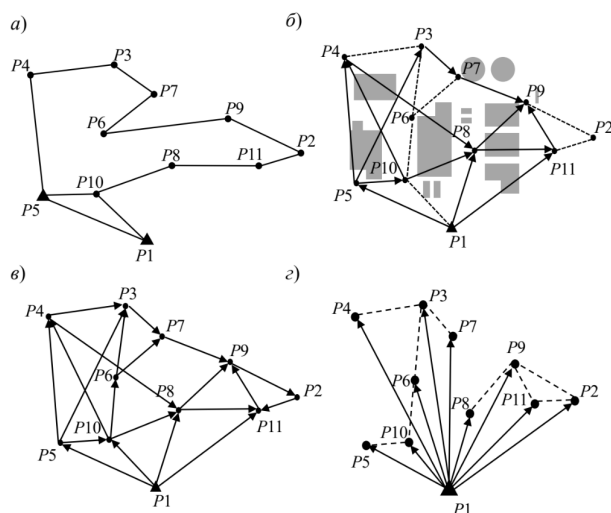
5 При априорно неизвестной скорости движения земной коры в пределах промышленной площадки АЭС за наиболее технологическую схему следует принимать ту, которая обеспечит наивысшую точность определения плановых координат пунктов ТГП.

6 Для поддержания единого координатного пространства промышленной площадки АЭС в актуальном состоянии с учетом сейсмической активности района необходимо реализовать совмещенную цикличность всей совокупности высокоточных геодезических измерений как при создании ТГП, так и при деформационном мониторинге особо опасных и технически сложных инженерных сооружений.

7 Корректировать интервал времени  $\Delta t$  между циклами геодезических измерений в зависимости от скорости развития динамических процессов земной поверхности и деформационного состояния инженерных сооружений на промышленной площадке.

Для определения наиболее технологичной, с точки зрения получения наивысшей точности определения координат пунктов ТГП, в диссертации было выполнено исследование следующих схем создания сети: высокоточной полигономет-

рии с короткими сторонами (до 300 м) с использованием наземных измерительных технологий (рисунок 3, а); комбинированного способа с использованием как наземных, так и спутниковых измерительных технологий (рисунок 3, б); сетевого варианта построения спутниковой сети, когда определяемые базовые векторы образуют замкнутые геометрические фигуры (рисунок 3, в); модифицированного варианта лучевого способа построения спутниковой сети, когда все базовые векторы определяются относительно одного исходного пункта, а для контроля точности ГНСС-определений измеряются длины линий электронным тахеометром (рисунок 3, г). Отметим, что последний вариант характеризуется минимальной трудоемкостью и наивысшей производительностью выполнения технологических операций.



Условные обозначения:




 — изменения, выполненные тахеометром;
  — измерения, выполненные с использованием GNSS-технологии;
  — измерения, выполняемые тахеометром для контроля точности GNSS-технологий

Рисунок 3 – Варианты схем построения ТПП на промплощадке АЭС

Необходимость исследования, а затем и применения различных схем геодезических измерений обусловлена утратой прямой оптической видимости между рядом пунктов ТПП в результате непрерывного строительства новых зданий и сооружений АЭС.

Наличие коротких длин линий и оптической видимости между пунктами ТГП на начальном этапе строительства обуславливает применение для первого цикла наблюдений использование высокоточной полигонометрии при типовой наземной измерительной технологии со средними квадратическими ошибками (СКО) измерения длин линий и углов не хуже  $m_s = 1,0$  мм,  $m_\beta = 1,0''$  (рисунок 3, а).

Повторные циклы наблюдений, выполняемые в период активного строительства зданий и сооружений АЭС в условиях утраты видимости между пунктами, обуславливают применение комбинированных схем построения, в которых сочетаются как традиционные наземные, так и спутниковые измерительные технологии с СКО определения базовых векторов в режиме статика  $m_{ГНСС} = 2,5$  мм +  $0,1 \times L_{(км)}$  в плане и  $3,5$  мм +  $0,4 \times L_{(км)}$  по высоте (рисунок 3, б, в, г).

Исследование точности предлагаемых схем построения ТГП выполнялось с использованием программного комплекса КРЕДО ГНСС и КРЕДО ДАТ. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка точности определения плановых координат в схемах построения ТГП

Название пункта ТГП	Результаты оценки точности положения пунктов (мм)											
	схема а			схема б			схема в			схема г		
	$m_x$	$m_y$	m	$m_x$	$m_y$	m	$m_x$	$m_y$	m	$m_x$	$m_y$	m
P1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
P2	–	–	–	1,7	2,1	2,7	2,6	2,3	3,5	3,6	3,3	4,9
P3	1,3	2,1	2,5	1,9	2,5	3,1	2,7	3,1	4,1	2,8	3,7	4,6
P4	1,7	1,7	2,4	2,1	2,3	3,1	1,9	2,8	3,4	4,2	3,3	5,3
P5	1,6	1,8	2,4	1,8	2,5	3,1	3,1	1,9	3,6	3,4	3,9	5,2
P6	1,4	1,9	2,4	1,3	1,9	2,3	2,2	2,4	3,3	2,9	3,2	4,3
P7	1,9	1,6	2,5	2,3	2,1	3,1	1,9	3,1	3,6	3,5	3,9	5,2
P8	1,1	1,4	1,8	1,5	2,8	3,2	3,2	2,2	3,9	4,1	3,9	5,7
P9	1,7	1,5	2,3	2,7	2,1	3,4	3,5	2,4	4,2	3,6	3,3	4,9
P10	1,1	1,4	1,8	2,1	2,3	3,1	2,8	3,3	4,3	3,2	2,8	4,5
P11	1,6	1,2	1,9	2,5	2,2	3,3	2,5	2,9	3,8	2,1	4,6	5,1

Как следует из анализа результатов исследования на начальном этапе при использовании типового измерительного оборудования наиболее точной является первая схема построения ТГП – высокоточный полигонометрический ход,

что объясняется более высокой точностью измерений электронным тахеометром на коротких длинах линий по сравнению с ГНСС-технологиями. Отметим, что в соответствии с действующими нормативно-правовыми документами допуск на точность определения плановых координат составляет  $m = 5$  мм.

При выполнении повторных циклов наблюдений рекомендуется комбинированное ГНСС-построение, представленное на рисунке 3, б и сочетающее сетевой вариант спутниковой сети с высокоточными наземными измерениями, которые выполняются электронным тахеометром по сторонам сети, на которых сохранилась прямая оптическая видимость. Вместе с этим следует отметить, что, исходя из трудоемкости выполняемых технологических операций, наиболее предпочтительным является модифицированный вариант построения комбинированной спутниковой сети, который, однако, характеризуется меньшей точностью определения координат.

Математическая обработка повторных циклов измерений предусматривает необходимость определения наиболее стабильного пункта ТТП. За наиболее стабильный будет приниматься тот пункт, относительно которого в сети будут минимальные изменения координат.

В результате применения данной методики на протяжении всего периода наблюдений наиболее стабильным является пункт Р1, относительно которого выполнялось дальнейшее уравнивание всей геодезической сети.

Результат математической обработки выполненных натурных высокоточных геодезических измерений (применение схемы построения на рисунке 3, б) в виде векторов смещения пунктов ТТП в графическом виде приведен на рисунке 4. На рисунке приведены векторы, соответствующие критерию, определяющему значимость смещения пункта и вычисляемому по формуле

$$\Delta \geq t \cdot m_{x,y} = 2 \cdot m_{x,y}, \quad (1)$$

где  $t$  – коэффициент, определяющий значимость смещения и которой при доверительной  $\beta = 0,95$  принимается равным 2;  $m_{x,y}$  – СКО определения координат

пунктов ТГП, полученная в результате выполненной априорной оценки точности (см. таблицу 1).

На рисунке 4 представлены векторы смещения пунктов ТГП, вычисленные в результате математической обработки результатов высокоточных измерений.

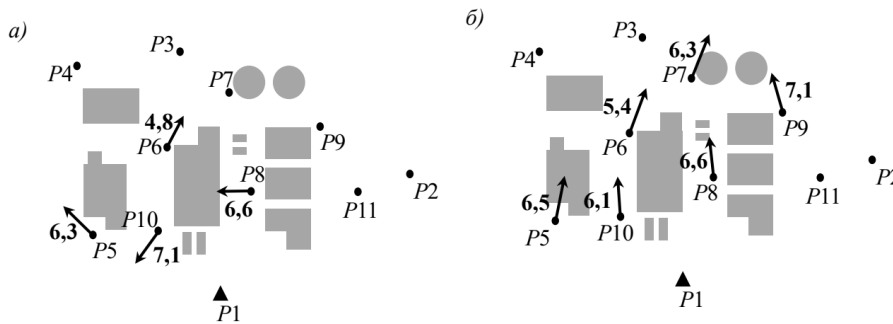


Рисунок 4 – Векторы планового движения пунктов ТГП, полученные в результате применения разработанной методики (смещения указаны в мм):

а) между первым и вторым циклом; б) между первым и последним циклом наблюдений

Таким образом, на промышленной площадке строящейся АЭС имеют место значимые смещения пунктов ТГП, что обуславливает необходимость учета этого фактора при деформационном мониторинге инженерных сооружений.

При выполнении высокоточных линейных геодезических измерений при построении ТГП и осуществлении деформационного мониторинга зданий и инженерных сооружений, в ряде случаев имеет место существенное влияние негативных внешних факторов, к которым, в том числе относится туман различной плотности. Влияние тумана на высокоточные измерения предлагается классифицировать по следующим признакам:

- низкая плотность – уверенное визуальное наведение на отражатель;
- средняя плотность – затруднительное визуальное наведение на отражатель;
- высокая плотность – наведение на отражатель возможно только с применением отражательных призм с инфракрасным идентификатором цели.

При выполнении измерений, в первом и втором случаях вводятся стандартные поправки за метеоусловия. При этом не принимается во внимание изменение плотности атмосферы, что обуславливает возможные дополнительные ошибки измерений. С целью учета возможных ошибок была проведена серия экспериментальных исследований, заключающихся в сравнении линейных измерений для линий, измеренных тахеометром Trimble S9 при благоприятных условиях и при различной плотности атмосферы (таблица 2).

Таблица 2 – Итоговые результаты экспериментальных исследований по влиянию внешних условий на точность линейных измерений

Средние значения измеренной длины линии из серии наблюдений				
При благоприятных условиях (м)		При наличии тумана с ведением стандартных поправок за метеоусловия, (м)		
Без поправки за метеоусловия	С поправкой за метеоусловия	Низкая плотность	Средняя плотность	Высокая плотность
458,7464	458,7451	458,7493	458,7511	458,7539
Влияние тумана на точность линейных измерений				
$\Delta$ (мм)	-1,3	+4,2	+6,0	+8,8

Анализируя результаты выполненных исследований, можно сделать следующие выводы:

– в пределах точности измерений неучёт стандартных поправок за метеоусловия приводит к уменьшению значения длин линий;

– выполнение измерений в условиях тумана приводит к увеличению значений длин линий, которые при его средней плотности превышают инструментальную СКО используемого электронного тахеометра;

– при средней и высокой плотности тумана выполнять измерения, даже при использовании самого современного измерительного оборудования, не рекомендуется.

Учитывая требования к обеспечению высокой точности измерений, предлагается перед началом очередного цикла наблюдений выполнять метрологическую поверку используемого электронного тахеометра. В связи с этим были разработаны две схемы, основанные на методе сличения.

При реализации первой схемы эталонный  $A$  и поверяемый  $A_1$  (или наоборот)

тахеометры устанавливаются по створу  $AB$  (с отклонением не больше 10–15 мм) на расстоянии 40–45 м друг от друга. При этом разность их горизонтов не должна превышать 45–50 мм (рисунок 5). В этом случае лазерные лучи практически составляют один пучок и влияние метеоусловий будет пренебрегаемо мало и поправки вводить не потребуется.

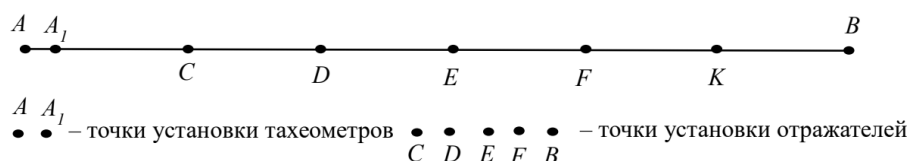


Рисунок 5– Проверка путем установки тахеометров в створ

Расчет отклонений для эталонного тахеометра рассчитывается как

$$\delta_i^{\text{этал}} = L_i^{\text{этал}} - L_{\text{ср.}}^{\text{этал}}, \text{ а оценка точности выполняется по формуле } m^{\text{этал}} = \sqrt{\frac{[\delta^2]}{n-1}}.$$

Расчет отклонений для поверяемого тахеометра рассчитывается как  $\Delta_i^{\text{пов.}} = L_i^{\text{пов.}} - L_i^{\text{этал}}$ ,

а оценка точности в таком случае рассчитывается по формуле  $m^{\text{пов.}} = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}.$

При расчете СКО измерений по представленным выше формулам с применением эталонного тахеометра (Leica TCR 1201) ошибка составила 0,26 мм, а для поверяемого (GeoMax) – также 0,74 мм.

Дальнейшая математическая обработка заключается в сравнении серии измерений, выполненных поверяемым и эталонным тахеометрами. Полученные разности измеренных расстояний (0,2–0,4 мм) также свидетельствуют о том, что данный поверяемый тахеометр соответствует своему классу точности.

Выполненные экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях подтвердили эффективность предлагаемой схемы метрологической проверки. СКО измерений с применением высокоточного тахеометра TCR1201 составила 0,26–0,34 мм.



Выполненная оценка точности построенной нивелирной сети с использованием программы КРЕДО ДАТ позволяет утверждать, что точность определения высотных отметок соответствует требованиям нормативных документов при построении ТПП на строящихся и действующих АЭС (СКО наиболее слабого репера в сети составила  $m_{н4} = 0,7$  мм, при нормативном значении  $m_{норм} = 1,0$  мм).

Создание ТПП позволяет поддерживать в актуальном состоянии единое координатное пространство, которое можно использовать как для определения деформационного состояния особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, так и для строительства новых объектов атомной энергетики.

В соответствии с разработанной технологической схемой (см. рисунок 2) для реализации деформационного мониторинга особо опасных и технически сложных инженерных сооружений предлагается схема выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений, представленная на рисунке 7.

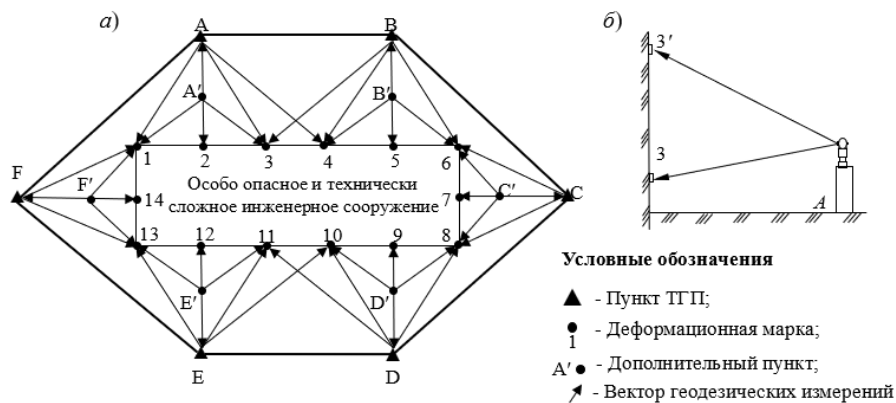


Рисунок 7 – Схема выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений для определения деформационного состояния инженерного сооружения на территории АЭС: а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости

В этом геодезическом построении: А, В, .....F – исходные пункты ТПП; А', В'...F' – дополнительные определяемые пункты (предлагаемая конструкция приведена в диссертации), обеспечивающие прямую оптическую видимость на деформационные марки (ДМ) 1, 2, ...14; светоотражающие марки, закрепленные

на поверхности контролируемого инженерного сооружения на уровне 0,4–0,6 м от поверхности земли. Для определения пространственного деформационного состояния предусматривается дублирование деформационных марок – 1', 2'.....14', которые закрепляются на уровне верха конструкции стены.

Расстояние от этих пунктов до инженерного сооружения, на котором расположены ДМ, предлагается устанавливать в пределах от 20 до 25 м, что в соответствии с выполненными исследованиями обеспечивает требуемую точность измерений и минимальное радиационное воздействие на исполнителей работ.

Для определения высотных отметок дополнительных пунктов А', В'...F' предлагается применять геометрическое нивелирование II класса с СКО измерения превышения на станции порядка 0,15–0,20 мм, которые опираются на исходные пункты ТПП, а для определения отметок ДМ на конструкции инженерного сооружения предлагается использовать высокоточное тригонометрическое нивелирование. Определение превышений должно выполняться двумя приемами с расхождением между превышениями не более 0,20–0,25 мм.

При такой схеме геодезического построения отметки ДМ определяются с нескольких исходных пунктов ТПП и с дополнительных пунктов геодезического построения. Следовательно, контроль точности их определения предлагается осуществлять в результате использования следующего уравнения:

$$H_i^{\text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{n}; \quad \Delta_H = H_j - H_i^{\text{cp}} \leq m_{\text{норм}}, \quad (2)$$

где  $i$  – номер ДМ;  $j$  – порядковый номер исходного пункта;  $n$  – число исходных пунктов, с которых выполнялись наблюдения на ДМ;  $m_{\text{норм}}$  – нормативная точность определения отметок ДМ, установленная действующим руководством.

При выполнении деформационного мониторинга состояния инженерных сооружений АЭС важным фактором является цикличность выполнения измерений. При создании ТПП на территории АЭС цикличность выполнения геодезических измерений устанавливается, как правило, два цикла в год.

Однако это требование не связано с цикличностью измерений для определения деформационного состояния при строительстве и эксплуатации особо опасных и технически сложных инженерных сооружений, например, здания реактора. В случае наличия сейсмической активности на территории АЭС возникает несоответствие между единым координатным пространством, зафиксированным ТГП, и деформационным состоянием объектов атомной энергетики.

Для устранения данного противоречия, которое при значимых скоростях развития деформационных процессов может привести к нарушению условий безопасного функционирования АЭС, предлагается совместить циклы геодезических измерений, выполняемых на ТГП с определением деформационного состояния наиболее ответственного здания АЭС – реакторного отделения (таблица 3).

Таблица 3 – Предлагаемая совмещенная цикличность выполнения нивелирования реперов ТГП и марок реакторного отделения

№ п/п	Этапы возведения реакторного отделения	Число циклов измерений и их последовательность
1	Начало разработки котлована под реакторное отделение	Один цикл по кустам реперов геодинимического полигона в зоне воронки оседания и реперам вне ее (исходный цикл нивелирования)
2	Разработка котлована под реакторное отделение	Один цикл измерений в месяц по кустам реперов геодинимического полигона в зоне воронки оседания и реперам вне ее.
3	Возведение фундамента под реакторное отделение	Один цикл измерений в квартал по указанным реперам геодинимического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
4	Начало возведения здания реактора	Один цикл измерений в квартал по указанным реперам геодинимического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
5	При достижении 25, 50, 75 и 100% нагрузки на фундамент	Четыре цикла измерений по указанным реперам геодинимического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
6	Пуск реактора	Один цикл измерений по указанным реперам геодинимического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
7	Эксплуатация реактора	Два цикла измерений в год по указанным реперам геодинимического полигона и маркам фундамента реакторного отделения
Примечание. Цикличность наблюдения за осадочными марками реакторного отделения может быть увеличена в зависимости от величины и скорости развития деформационных процессов.		

Предложенная совмещенная цикличность выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений позволит научно-обоснованно оценивать деформационное состояние особо опасных и технически сложных инженерных сооружений в условиях тектонической активности на территории промышленной площадки АЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании теоретических и экспериментальных исследований достигнута цель: разработана методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений на ТГП и обеспечения единого координатного пространства для деформационного мониторинга земной поверхности, а также особо опасных и технически сложных инженерных сооружений. Основные научные и практические результаты при выполнении поставленных задач:

– выполнен информационно-аналитический анализ существующих методик и средств производства инженерно-геодезических измерений, на основании которого было установлено, что в настоящее время не в полной мере разработана методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений при создании ТГП на промышленных площадках АЭС для деформационного мониторинга земной поверхности и расположенных на них особо опасных и технически сложных инженерных сооружений;

– на основании современного уровня развития геодезического измерительного оборудования предложена методика производства высокоточных инженерно-геодезических измерений и выполнены исследования вариантов построения ТГП, позволяющие при минимальной трудоемкости с заданной нормативной точностью создать и поддерживать в актуальном состоянии единое координатное пространство для строительства и деформационного мониторинга объектов атомной энергетики с учетом тектонических процессов территории промышленной площадки АЭС;

– выполнены экспериментальные исследования по влиянию неблагоприятных погодных условий, позволившие установить области возможного выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений в зависимости от плотности тумана;

– разработана схема метрологической поверки, которая позволяет регулярно проводить поверку электронных тахеометров для выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений в неблагоприятных условиях промышленной площадки для строящейся и действующей АЭС без применения эталонных линейных базисов;

– для реализации деформационного мониторинга опасных и технически сложных инженерных сооружений в условиях тектонических воздействий на территорию АЭС в едином координатном пространстве (совмещенная цикличность измерений) предложены и выполнены исследования схем производства высокоточных инженерно-геодезических измерений;

– проведена апробация разработанной методики производства высокоточных инженерно-геодезических измерений в условиях строящейся АЭС, которая доказала эффективность предложенных технологических решений, позволяющих без снижения нормативной точности выполнять деформационный мониторинг опасных и технически сложных инженерных сооружений.

Разработанная и апробированная методика выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений рекомендуется к применению на ТГП строящихся и эксплуатируемых АЭС с реакторами ВВЭР-1200. При ее применении будет с необходимой точностью определяться деформационное состояние промплощадки, здания реактора и системы «турбоагрегат-фундамент-основание».

Перспектива дальнейших исследований заключается в дальнейшем совершенствовании технологических решений при производстве высокоточных инженерно-геодезических измерений для определения деформационного состояния особо опасных и технически сложных инженерных сооружений АЭС с учетом применения нового измерительного технологического оборудования: роботизированных тахеометров, высокоточных наземных лазерных сканеров, а также лазерных трекеров.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ  
ДИССЕРТАЦИИ

1 Методика выполнения нивелирования III и IV классов тригонометрическим способом / Г. А. Уставич, А. А. Никонов, В. Г. Сальников, Н. М. Рябова, А. С. Горилько. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 7. – С. 2–11.

2 Разработка стационарного лабораторного стенда для поверки тахеометров / Г. А. Уставич, И. Ю. Васютинский, Д. А. Баранников, А. С. Горилько. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 45–53. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-45-53. (К 1)

3 Совершенствование методики поверки тахеометров методом сличения без компаратора / Г. А. Уставич, И. Ю. Васютинский, Д. А. Баранников, А. С. Горилько, А. М. Астапов, Иван Абид оглы Мезенцев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 17–30. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-17-30. (К 1)

4 О выборе конструкции пунктов высотной основы на промплощадке тепловых электростанций / В. Г. Сальников, А. С. Горилько, А. М. Астапов, Б. Д. Чебаков. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 47–56.

5 Сальников, В. Г. Использование данных цифровых инженерно-топографических планов на территории строительной площадки / В. Г. Сальников, А. С. Горилько, А. М. Астапов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. научн. техн. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск: сборник материалов в 8 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 51–56. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-51-56.

6 Сравнение способов создания обоснования на промплощадке / А. С. Горилько, М. А. Минаева, Н. М. Рябова, А. М. Астапов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Междунар. научн. техн. конгр., 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – С. 60–64. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-60-64.

7 Исследование стабильности положения пунктов обоснования при их закреплении на разных горизонтах инженерных сооружений / А. С. Горилько, А. М. Астапов, Н. М. Рябова, Т. Д. Денисович. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15–17 мая 2024 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – С. 37–43. – DOI 10.33764/2618-981X-2024-1-37-43.

8 Горилько, А. С. Выполнение высокоточного полигонометрического хода короткими лучами для создания планового обоснования на техногенном геодинамическом полигоне / А. С. Горилько Н. М. Рябова, А. Р. Якушева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Междунар. научн. техн. конгр., 21–22 мая 2025 г., Новосибирск : сборник материалов в 6 т. Т. 1: Междунар. научн. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2025. – С. 41–67. – DOI 10.33764/2618-981X-2025-1-1-41-67.