

На правах рукописи

Морозов Артем Викторович



Разработка методики учета вариаций силы тяжести при строительстве
уникальных сооружений

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Государственный университет по землеустройству».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Баранов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

Непоклонов Виктор Борисович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», профессор кафедры высшей геодезии;

Голдобин Денис Николаевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», доцент кафедры космической и физической геодезии.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук (г. Москва).

Защита состоится 9 декабря 2025 г. 12-00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 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/morozov-artem-viktorovich/>

Автореферат разослан 30 октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 02.10.2025. Формат 60 × 84 1/16.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 121.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При проектировании, строительстве и эксплуатации уникальных сооружений (УС), таких как атомные электростанции (АЭС), гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), гидроэлектростанции (ГЭС), необходимо учитывать, что они располагаются рядом с крупными водоемами, что приводит к неравномерным деформациям УС, вызванным повышением уровня грунтовых вод, и усадкам грунта.

Для оценки геодинамических условий в районах размещения УС организуется специальная наблюдательная сеть, в пределах которой ведутся периодические комплексные высокоточные наблюдения (геодезические, геофизические). Пункты, составляющие эту сеть, принято называть пунктами геодинамического полигона (ГДП).

Параллельно с наблюдениями на ГДП на площадках УС проводится гидрогеологический мониторинг с применением пьезометрических скважин, по которым оценивается динамика изменения уровня подземных вод вблизи УС.

На сегодняшний день соблюдение принятых на производстве методик сравнения скоростей движения пунктов ГДП с периодичностью один раз в год и применение только геодезического мониторинга не дают комплексной и достоверной информации о деформационных процессах на геодинамическом полигоне, поскольку предположение, что скорость движения пунктов ГДП равномерная, верно только в первом приближении. В связи с этим обстоятельством необходима новая методика для повышения точности и надежности геодезических данных при строительстве УС для учета суммарных факторов, оказывающих сезонное влияние на высоты пунктов ГДП. В противном случае, неучет комплексного воздействия может привести к неправильной интерпретации результатов и катастрофическим последствиям в будущем, чем и обусловлена востребованность проведенного научного исследования.

Исходя из вышеизложенного, актуальность диссертационного исследования обусловлена необходимостью повышения точности определения нормальных высот пунктов, что позволит повысить эффективность проектирования, строительства и эксплуатации уникальных сооружений, таких как АЭС, ГАЭС, ГЭС, располагающихся в непосредственной близости к водным объектам. В связи с этим разработка методики учета влияния функции трех переменных (нормальных высот, уровня грунтовых вод и силы тяжести) на пунктах геодинимического полигона представляется актуальной и востребованной в производственной деятельности.

Степень разработанности темы диссертационной работы определяется изучением научных исследований и трудов в области влияния геотехнических и геодинимических факторов на силу тяжести и высокоточные высотные геодезические измерения. Исследованиями по данной тематике занимались следующие авторы: Баранов В. Н., Бузук В. В., Вовк И. Г., Вершинина Ю. В., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Калинин В. В., Канушин В. Ф., Карпик А. П., Кафтан В. И., Косарев Н. С., Костицын В. И., Маркович К. И., Непоклонов В. Б., Попадьев В. В., Устинов А. В., Хорошилов В. С., Чистякова Е. А., Шароглазова Г. А.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка методики учета влияния сезонных вариаций силы тяжести (ВСТ) и колебаний уровня грунтовых вод на высоты пунктов ГДП при строительстве и эксплуатации УС.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие научно-технические задачи:

- выполнить информационно-аналитический обзор существующих публикаций по теме исследования;
- выявить влияние изменения уровня грунтовых вод на значения силы тяжести, нормальных и геодезических высот пунктов ГДП;
- разработать критерий выбора зон влияния ВСТ на пункты ГДП;
- разработать и апробировать методику учета сезонных ВСТ и колебаний уровня грунтовых вод в высоты пунктов ГДП.

Объектом исследования является геодезическое обеспечение проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, включая в том числе и гидротехнические сооружения.

Предметом исследования выступают технологические операции, выполняемые при учете сезонных вариаций силы тяжести и колебаний уровня грунтовых вод на нормальные высоты пунктов геодинимического полигона в прибрежной полосе строительной площадки уникального сооружения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработан критерий выбора зон влияния ВСТ на результаты геодезических наблюдений, позволяющий определить границу применимости методики;
- разработан алгоритм учета геотехнических параметров с использованием функции трех переменных на высоты пунктов ГДП;
- предложена конструкция пункта ГДП для оперативного учета геотехнических параметров при изменяющихся гидрологических условиях на пунктах ГДП в процессе строительства и эксплуатации УС.

Теоретическая значимость заключается в расширении научных знаний о комплексном влиянии вариаций силы тяжести при изменении уровня грунтовых вод на нормальные высоты пунктов геодинимического полигона прибрежной полосы.

Практическая значимость заключается в использовании разработанной методики соответствующими проектными, строительными и эксплуатационными структурными подразделениями при геодезическом обеспечении всего жизненного цикла уникального сооружения.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационных исследований являлись наблюдение, эксперимент, измерение, математический и корреляционный анализ, теория математической обработки геодезических измерений. В ходе исследования была проанализирована научная литература по теме диссертации, нормативная документация и стандарты организаций.

Положения, выносимые на защиту:

- предложенный критерий позволяет определить зону влияния вариации силы тяжести на результаты геодезических наблюдений на прибрежных территориях;
- разработанная методика учета изменения геотехнических параметров, позволяет повысить точность определения нормальных высот на пунктах геодезического полигона.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует направлениям исследований: 1 – Определение формы поверхности и гравитационного поля Земли, их изменений в пространстве и времени с использованием наземных, морских, аэрокосмических средств измерений. Теория вращения Земли и глобальная геодинамика, включая изучение параметров вращения Земли, движения ее центра масс, изменений уровня моря, гляциоизостазии и других движений и деформаций природного и антропогенного происхождения; 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; 9 – Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, вызванного природными и техногенными факторами, в том числе в сейсмоопасных и вулканических районах, в областях разработки полезных ископаемых, на подземных хранилищах газа и др. Исследования атмосферы, ионосферы и космической погоды с использованием спутниковых геодезических наблюдений паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные результаты и выводы в диссертации являются обоснованными, что подтверждается многочисленными наблюдениями, строгими методами обработки и отбраковки полученных результатов. Все вычисления производились при помощи ЭВМ, опубликованные материалы проходили внутреннюю экспертизу в рецензируемых научных журналах. Основные результаты исследований докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Научно-педагогическое и культурное наследие российской межевой школы» (Москва, 2016), V Международной научно-практической конференции «Современные проблемы землепользования и кадастров» (Москва, 2020), XVI научно-практической конференции «Научные исследования и разработки молодых учёных для развития АПК» (Москва, 2023), «Современные проблемы и перспективы Градостроительства» (Москва, 2024), XX Международной выставке и научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2024), XXI Международной выставке и научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2025).

Результаты диссертационного исследования нашли применение в ООО «СпецСтройЭксперт» при оценке и прогнозировании состояния исходных пунктов геодезической сети, а также позволили выявить сезонные колебания деформаций некоторых реперов.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 научных работах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 154 страницы машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования, содержит 59 таблиц, 49 рисунков, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены типы сооружений, относящиеся к уникальным сооружениям (УС), обосновывается актуальность и востребованность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности и апробации результатов исследований.

В первом разделе выполнен анализ существующей нормативной документации и научных исследований по выполнению нивелирных, спутниковых, гравиметрических и геодинамических работ, исходя из развития современного программного обеспечения, инструментов и технологий.

Теоретические и практические аспекты изменения уклонения отвеса на пунктах ГДП вблизи водохранилищ и плотин представлены в научных трудах Бузука В. В., Вовка И. Г., Ганагиной И. Г., Канушина В. Ф. (Саяно-Шушенская ГЭС), а сезонность перемещения гребня плотины подтверждается работами Люцко Е. А., (Чиркейская ГЭС), Воронковым О. К., Ушаковой Л. Ф. и другими авторами АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева».

Доказано, что изменение уровня воды на водохранилищах происходит неравномерно, что позволяет проконтролировать колебания реперов ГДП за ВСТ сразу же после поднятия вод в водохранилищах, вычислить и внести соответствующие поправки в результаты геодезических измерений.

Выполненные исследования Марковича К. И., Шароглазовой Г. А. по учету ВСТ на Белорусском ГДП показали, что отдельные поправки в нивелирных ходах протяженностью до 40 км превышали 10 мм, что свидетельствует о значимости учета неоднородности гравитационного поля.

Иная ситуация наблюдается с сезонными колебаниями уровня подземных вод прибрежных территорий. Наблюдаемая динамика изменений периодическая, с неравномерными зонами заполняемости, что приводит и к неравномерным ва-

риациям силы тяжести и деформациям. Примерный наблюдаемый период составляет полгода. Достоверным контролем изменения геотехнической ситуации в таком случае является проведение совместных циклов геотехнических и гравиметрических наблюдений, комплексный анализ и учет полученных данных в результатах мониторинговых геодезических наблюдений на пунктах ГДП.

Диссертационная работа Вершининой Ю. В. по изучению деформаций на ГДП нефтегазовых месторождений подтверждает сезонность изменения высот грунтовых реперов, расположенных вблизи р. Дон, однако контур исследований не охватывает влияние изменения силы тяжести.

Дополнительно были изучены результаты геодинимических исследований Герасимова Г. Н., Герасименко М. Д., Мазурова Б. Т., Мельникова А. Ю., Непоклонова В. Б., Серебряковой Л. И., Суздалева А. С., Трофимова Д. А. Шестакова Н. В. и других авторов.

В работе Спесивцева А. А. представлены результаты влияния гидрологической нагрузки на ВСТ, однако приведенные им значения изменений (до 10 мкГал) расходятся с полученными экспериментальными данными и требованиями инструкции по развитию высокоточной гравиметрической сети (8–17 мкГал на 1 м грунтовых вод) и с монографией Юзефовича А. П. (17 мкГал на 1 м грунтовых вод в слое песка средней плотности).

Теоретической и терминологической базой являются труды Огородовой Л. В. и Серепинаса Б. Б.

За рубежом подобными научными исследованиями занимались Tarpley B. D., Watkins M. M., Ries J. C., McCarthy D. D., Hughes C. W., Bingham R. J., Smith D. A., Li Z., Fielding E.

Анализ изученных источников продемонстрировал как отсутствие единой методики в нормативной документации для учета сезонных колебаний геотехнических параметров на результаты геодезических мониторинговых наблюдений, так и сложность разработки методики, требующей материалов и учета различных разделов инженерных изысканий.

Стоит отметить, что несмотря на цифровизацию нивелирования, не существует достойной замены ГНТА-03-010-03 «Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов», даже с учетом изменений в методике полевых работ и способах обработки результатов цифрового нивелирования. СТО 95 12031–2017 и СТО СРО-Г 60542954 00007–2023 объединяют характеристики ГКИНП-03-010–03 и П-648, но в них недостаточно освещен вопрос внесения поправок за ВСТ в результаты высокоточных высотных измерений.

Второй раздел содержит теоретическую базу как обоснование дальнейшего исследования гравитационного поля, систем высот и их применения в геодезии и геодинاميке, в разделе также приведена модель сезонных деформаций пунктов ГДП.

Когда речь заходит о высокоточных работах, таких как исследования современного движения земной поверхности (СДЗП), необходимо учитывать неоднородность гравитационного поля при выполнении анализа геодезических, гравиметрических, гидрологических, геофизических, сейсмологических данных для комплексной и достоверной оценки результатов наблюдений за горизонтальными и вертикальными движениями земной поверхности.

В тексте диссертационной работы приведено объяснение понятия высоты с физической и геометрической точек зрения. Интерес представляет исследование систем высот авторов Marcelo S., Ismael F. и Попадьева В. В., в котором приведена динамика изменений расстояния от поверхности геоида (ортометрическая высота). В отличие от нормальной высоты, изменение ортометрической высоты в смоделированном вытянутом горизонтальном тоннеле в горном массиве составило 2 см на 1 км, что является неприемлемой погрешностью при высокоточных работах.

В рамках диссертационной работы выполнена оценка устойчивости пунктов ГДП по геодезическим высотам.

Отметим при этом, что одинаковое изменение геодезических высот на пунктах ГДП является критерием их равномерной осадки (поверхность равномерно

поднимается – опускается), в то время как аномальное изменение геодезической высоты при геодинамическом мониторинге на одном из пунктов может служить критерием его неравномерной осадки.

В рамках исследования влияния уровня подземных вод и плотности грунтов на изменение силы тяжести на локальном участке строительства УС, как один из способов учета, предлагается комбинирование гидрогеологических и геофизических данных (скважины определяют уровень подземных вод и при бурении определяют свойства грунта) и введение этих переменных в формулу при вычислении аномалии Буге (пластина Буге) при построении гравиметрической карты

$$\Delta g_B = 0.42(\sum_{\Pi=1}^m \delta_{\Pi} H_{\Pi} + \sum_{B=1}^k H_B \delta_B), \quad (1)$$

где Δg_B – поправка за влияние топографических масс (аномалия Буге);

δ_{Π} – плотность преобладающего грунта;

δ_B – плотность водоносного слоя, для чистой воды плотность 1,00 г/см³, морской воды 1,03 г/см³;

H_B – общая толщина водоносного слоя в см;

H_{Π} – общая толщина грунта над поверхностью точки наблюдения в см;

G – гравитационная постоянная в системе CGS $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-2}$.

Третий раздел посвящен результатам анализа гравиметрических наблюдений в разные сезоны, приведены методы обработки спутниковых и нивелирных измерений.

Выполненное сравнение результатов мониторинговых наблюдений сезонных вариаций силы тяжести на пунктах ГДП продемонстрировало значительные колебания силы тяжести для пунктов прибрежной полосы (рисунок 1).

Разработан необходимый для методики критерий влияния ВСТ на пункты ГДП в качестве удвоенного значения изменения силы тяжести за один метр грунтовых вод – равный 35 мкГал.

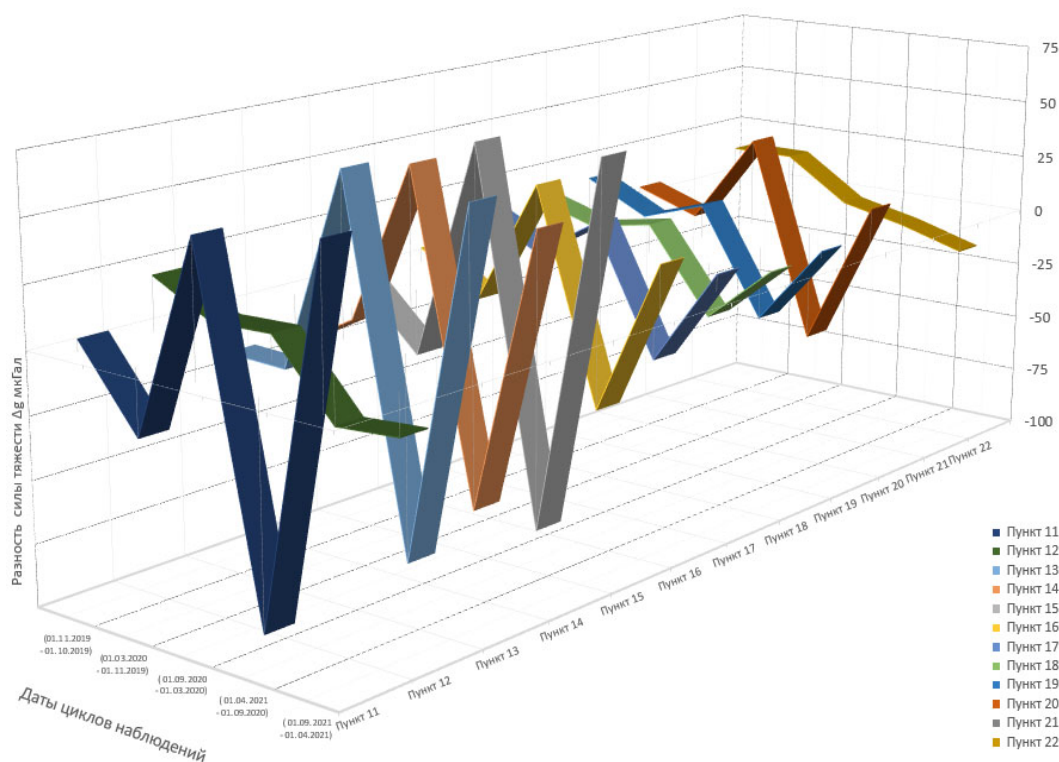


Рисунок 1 – Межцикловое изменение ускорения силы тяжести на пунктах ГДП за несколько лет наблюдений

Четвертый раздел посвящен методике учета геотехнических параметров функций Φ (разность уровня грунтовых вод – ΔGP), разность силы тяжести (ΔF) и T (разность высот (ΔH), ΔGP , ΔF) и разработан способ вычисления уровня грунтовых вод на пунктах ГДП. На сегодняшний день в нормативной документации нет четких указаний по размещению пьезометрических скважин рядом с пунктами ГДП, что вынуждает прибегать к интерполированию данных для пунктов, рядом с которыми отсутствуют пьезометрические скважины.

Показан график изменения уровня грунтовых вод за несколько лет наблюдений на основе данных с пьезометрических скважин, равномерно расположенных на площадке УС (рисунок 2).

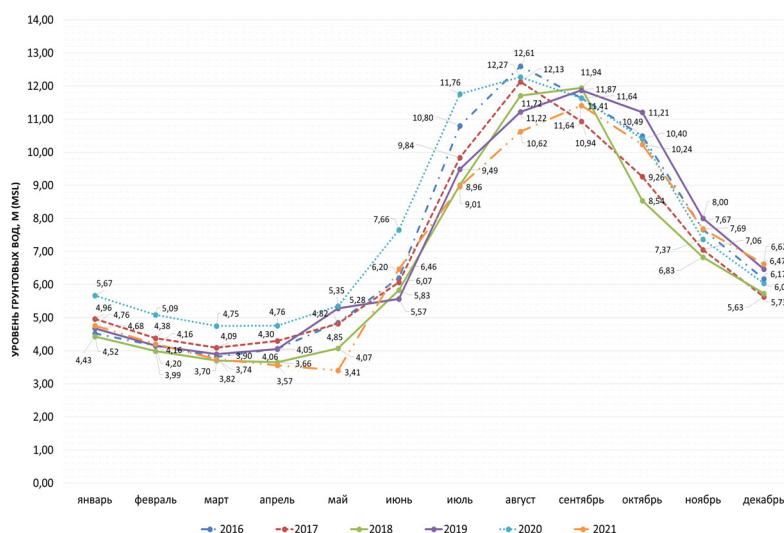


Рисунок 2 – Изменения уровня грунтовых вод в пьезометрических скважинах в среднем по площадке за несколько лет наблюдений

Вычислены коэффициенты Пирсона (R) между исследуемыми параметрами с целью выявления зависимости между уровнем грунтовых вод и силой тяжести на пунктах ГДП экспериментального полигона. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Корреляционный анализ изменения уровня грунтовых вод и ВСТ на пунктах ГДП экспериментального полигона

Коэффициент корреляции, R			
Время	март 2020 – сентябрь 2020	март 2020 – апрель 2021	сентябрь 2020 – апрель 2021
PG02	0,93	0,93	0,93
PG09	0,93	0,93	0,93
PG10	0,93	0,93	0,93
PG11	0,93	0,93	0,93
PG16	0,93	0,93	0,93

Результаты, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о высокой корреляционной зависимости исследуемых параметров.

В рамках выполненных исследований разработан алгоритм учета геотехнических параметров функций Φ ($\Delta GР$, ΔF) и T (ΔH , $\Delta GР$, ΔF) на пунктах ГДП. Вы-

полнена оценка точности полученных функций и корректировка нормальных высот пунктов ГДП экспериментального полигона с учетом вычисленных весов функций Φ (ΔG_P , ΔF) и T (ΔH , ΔG_P , ΔF).

Общая блок-схема разработанной методики представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Разработанный алгоритм применения методики учета геотехнических параметров Φ (ΔG_P , ΔF) и T (ΔH , ΔG_P , ΔF) на пунктах ГДП

Разность высот и СКП пунктов ГДП экспериментального полигона до внесения коррекций за сезонные колебания представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Разность высот и СКП пунктов ГДП экспериментального полигона до внесения коррекций

№ пункта	март – сентябрь 2020, мм	сентябрь 2020 – апрель 2021, мм
Исходный	0	0
PG10	1,7	2,0
PG16	6,2	6,5
PG11	6,3	7,3
PG11	10,4	12,0
PG02	0,4	2,4
Σ	25,0	30,2
СКП	5,6	6,5

Погрешности, полученные между циклами наблюдений при максимальном и минимальном уровне грунтовых вод, будут включать в себя как ошибки самого нивелирования, так и полученные закономерности изменения геотехнической ситуации, за исключением первого (исходного) репера

$$\Delta H_{ik(n+1)} = H_{k(n+1)} - H_{i(n+1)}, \quad (2)$$

где $\Delta H_{ik(n+1)}$ – разность уравнированных высот между i -м циклом нивелирования при минимуме уровня грунтовых вод и k -м циклом при максимуме уровня грунтовых вод n -го репера

Тогда условные уравнения связи

$$\begin{aligned} \Delta H_{ik1} &= 0; \\ \Delta H_{ikn} &= \mu_{ikn} + \eta_{ikn} + \xi_{ikn}, \end{aligned} \quad (3)$$

где μ_{ikn} – комплекс ошибок геометрического нивелирования n -го репера;

ΔH_{ik1} – разность высот исходного репера;

η_{ikn} – сезонное колебание высот n -го репера;

ξ_{ikn} – влияние ВСТ на результаты геометрического нивелирования n -го репера.

Приняв тот факт, что суммы $[\mu_{ikn}] + [\eta_{ikn}] + [\xi_{ikn}]$ есть суммарная упругая деформации пункта, получим

$$DEF_{ikn}(\text{упр}) = [\mu_{ikn} + \eta_{ikn} + \xi_{ikn}]. \quad (4)$$

После внесения коррекций, с применением функции Т (ΔH , ΔGP , ΔF) (таблица 3) получаем уменьшение СКП высот пунктов ГДП.

Таблица 3 – Разность высот и СКП пунктов ГДП экспериментального полигона после внесения коррекций

№ пункта	Март – сентябрь 2020, мм	сентябрь 2020 – апрель 2021, мм
Исходный	0,0	0,0
PG10	0,9	4,1
PG16	2,5	2,6
PG11	3,7	9,0
PG11	2,7	1,7
PG02	2,6	8,9
Σ	12,4	26,3
СКП	2,4	5,6

В результате улучшение точности получаемых высот после учета комплексных коррекций на период март – сентябрь составляет более 50 %, для периода апрель – сентябрь более 15 %, что говорит об эффективности методики.

В рамках исследования параллельно была апробирована методика учета колебаний высот пунктов ГДП с помощью ГНСС-технологий для геодинимических исследований.

Продемонстрированы изменения геодезических высот в разные сезоны года для пунктов, попадающих в зону влияния ВСТ. Аномальные изменения отмечены на одном из пунктов исследования – РРС0, находящегося в области сезонного влияния ВСТ (рисунок 4).

Два других пункта (РРС3, РРС4) демонстрируют стабильность в течение нескольких циклов наблюдений и, следовательно, находятся вне зоны влияния ВСТ. В ходе обследования пункта РРС не было выявлено каких-либо повреждений в период с 2017 по 2021 г.

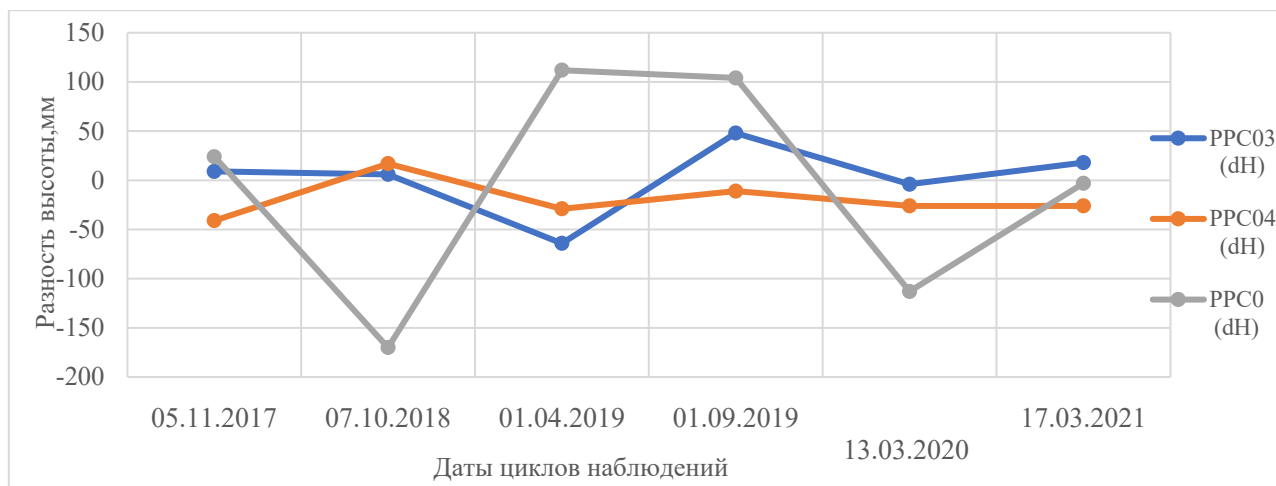


Рисунок 4 – Графики изменения геодезической высоты с 2017 по 2021 г.
на пунктах исследования

Предлагается следующая схема проектных спутниковых наблюдений с учетом анализа геотехнических параметров (рисунок 5).

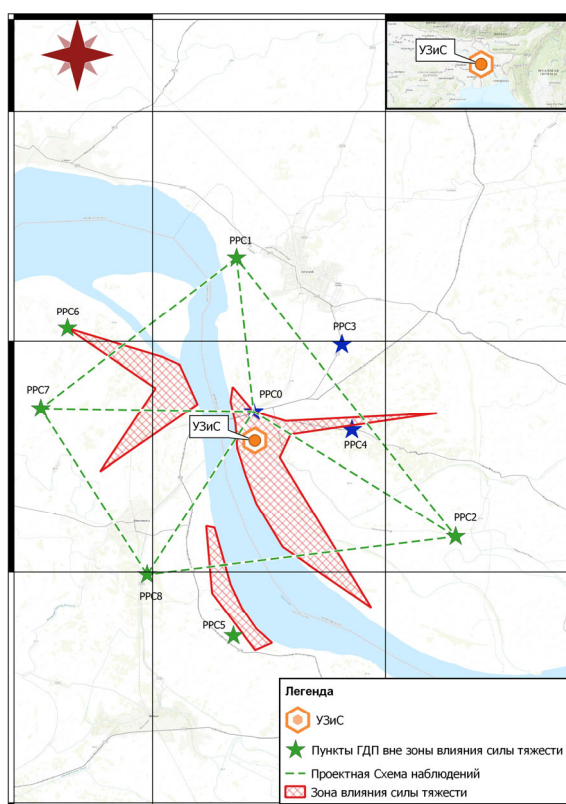


Рисунок 5– Схема проектных спутниковых наблюдений на площадке строительства УС с учетом анализа геотехнических параметров

Разработана конструкция исходных пунктов ГДП для реализации комплексных геотехнических наблюдений и размещения постоянно действующей базовой станции ГНСС (рисунок 6).

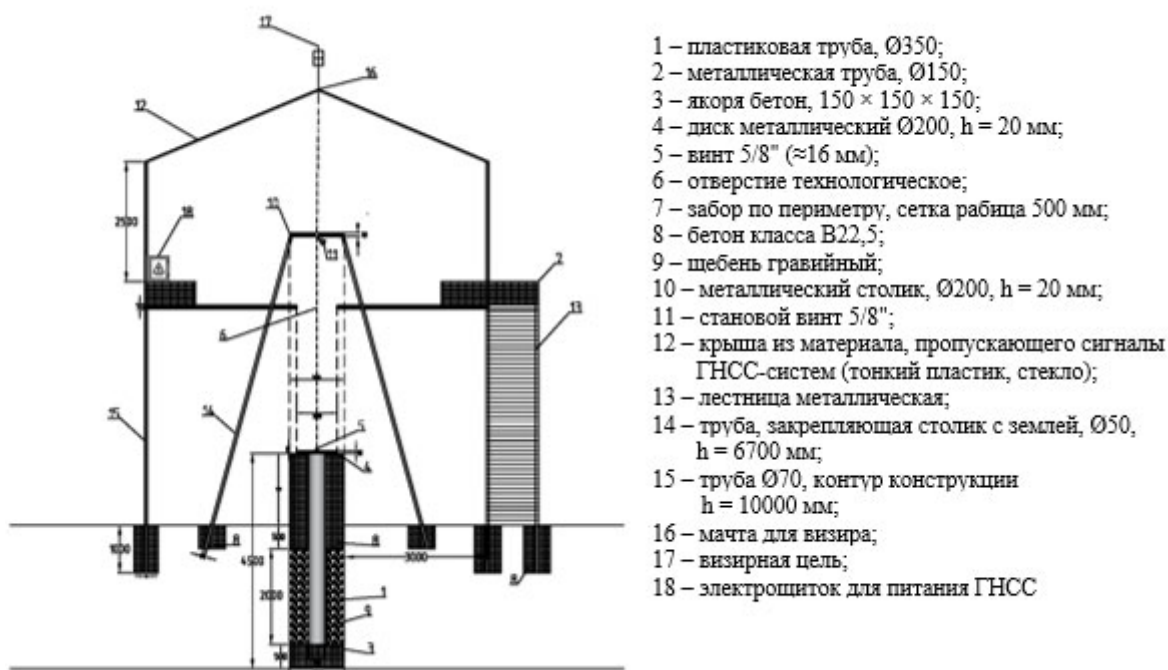


Рисунок 6 – Предлагаемая конструкция исходных пунктов ГДП

На примере пункта ITRF вблизи УС продемонстрировано определение упругих, остаточных и суммарных деформаций с применением постоянно действующей базовой станции ГНСС на исходном пункте ГДП.

В качестве независимого доказательства сезонности изменения геодезических высот были использованы результаты станций ITRF вблизи места исследования. В случае, если пункт ГДП находится в области аномальных гидрогеологических изменений, амплитуда и траектория будет претерпевать колебания, представленные на рисунке 7.

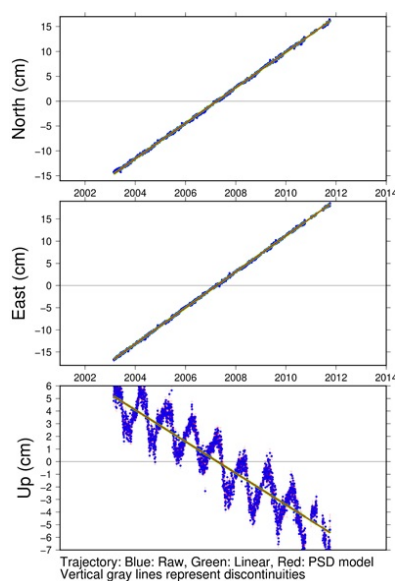


Рисунок 7 – Траектория изменения положения пункта ITRF в области аномальных изменений уровня грунтовых вод вблизи реки

В случае, если пункт ITRF претерпевает стандартные (атмосферные) сезонные гидрогеологические колебания, динамика изменений и траектория положения будут выглядеть, как на рисунке 8.

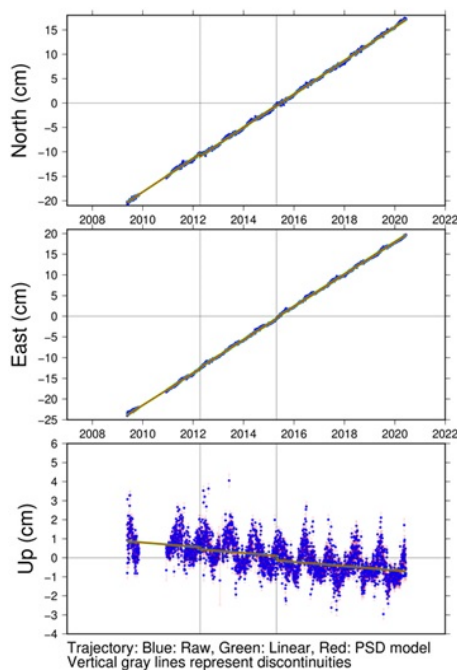


Рисунок 8 – Траектория изменения положения пункта ITRF, расположенного вдали от аномального изменения гидрогеологической ситуации

Графически упругую, остаточную и общую деформацию на исследуемом пункте ITRF можно представить, как показано на рисунке 9.

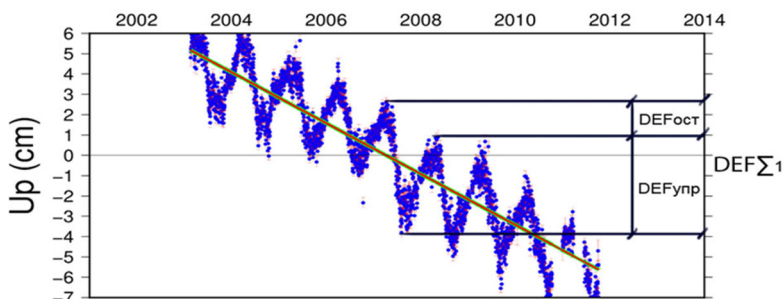


Рисунок 9 – Виды деформаций на примере пункта ITRF в области аномальных изменений уровня грунтовых вод

Таким образом, имея систему непрерывного наблюдения на исходном пункте ГДП, перманентно вводятся поправки за упругую деформацию и выполняется переуровнивание высот пунктов ГДП.

Для улучшения моделирования поведения пункта ГДП целесообразно применять билинейную модель основания Федоровского В. Г. с переменным коэффициентом постели. Рекомендации по вычислению коэффициента пропорциональности приведены в нормативном документе СП 50-102–2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов.

На заключительном этапе исследования по изменениям силы тяжести и уровня грунтовых вод построены аппроксимирующие уравнения и произведена оценка точности.

Итоговое уравнение примет вид

$$y = -0,0004x^6 + 0,0262x^5 - 0,6573x^4 + 7,3816x^3 - 36,3729x^2 + 69,1952x - 44,8724, \quad (5)$$

где x – номер месяца;

y – смоделированное значение разности силы тяжести.

Средняя квадратическая погрешность построенной модели составляет 12 мкГал. При этом средняя квадратическая погрешность аппроксимации полиномом средних ВСТ по многолетним наблюдениям составляет 27 мкГал (таблица 4, рисунок 10). Следует отметить, что полное уравнение со всеми значащими цифрами представлено в тексте диссертационной работы.

Таблица 4 – Разность измеренных значений ВСТ и модельных: по разработанной методике (Δ_M) и с использованием аппроксимации полиномом ($\Delta_{ап}$)

Дата	Δ_M , мкГал	$\Delta_{ап}$, мкГал
01.11.2019	0,0	3,8
01.12.2019	-2,4	-20,0
01.02.2020	-10,7	-20,5
01.04.2020	-3,3	7,5
01.06.2020	10,5	15,0
01.08.2020	14,0	9,0
01.10.2020	11,0	11,0
01.12.2020	0,8	17,0
01.02.2021	-21,2	11,0
01.05.2021	-20,3	-40,0
01.07.2021	4,5	-63,0
01.08.2021	12,2	-43,0
01.09.2021	15,7	-7,1
СКП, мкГал	11,9	26,6

Таким образом, построенная модель (формула (5)) показывает лучшую точность по сравнению с аппроксимирующим полиномом, представленном на рисунке 10.

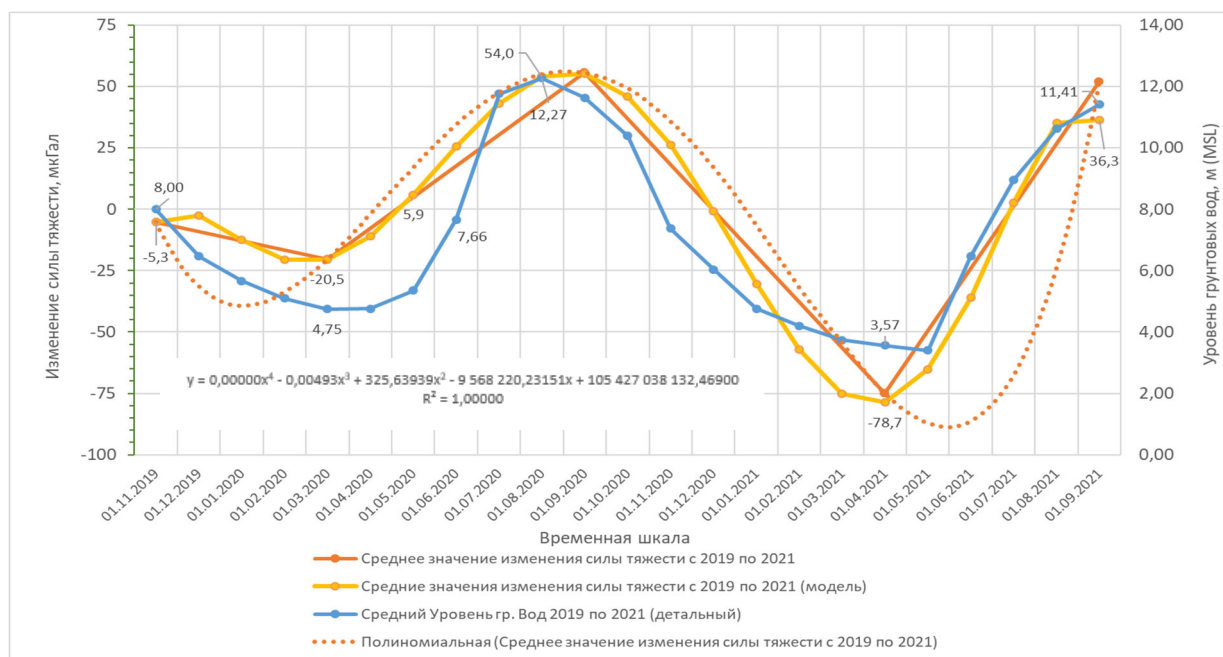


Рисунок 10 – Смоделированный график изменения силы тяжести на УС с применением гидрогеологической информации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы для повышения точности и надежности наблюдений на пунктах ГДП в разные сезоны года разработана методика учета сезонных ВСТ и колебаний уровня грунтовых вод на высоты пунктов ГДП при строительстве и эксплуатации УС.

Научно-практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

- выполнен информационно-аналитический обзор существующих публикаций по теме исследования, что позволило выявить недостатки существующих методик учета вариации силы тяжести и колебаний уровня грунтовых вод на пунктах ГДП, расположенных рядом с водными объектами, систематизировать накопленный опыт и определить цели и задачи научного исследования;

– выявлено влияние изменения уровня грунтовых вод на значения силы тяжести, нормальных и геодезических высот пунктов ГДП, что продемонстрировало зависимость высот пунктов ГДП, находящихся в критерии, от геотехнических параметров и послужило основанием для создания методики учета сезонных вариаций силы тяжести и колебаний уровня грунтовых вод в высоты пунктов ГДП;

– разработан критерий выбора зон влияния ВСТ на пункты ГДП, позволивший определить границу применимости разработанной методики;

– разработана и апробирована методика учета сезонных ВСТ и колебаний уровня грунтовых вод в высоты пунктов ГДП, позволяющая повысить точность определения нормальных высот.

Результаты диссертационной работы рекомендуется применять для анализа геодинамической ситуации на прибрежных площадках строительства УС, особенно при существенном сезонном изменении гидрогеологической ситуации. Рекомендуется устанавливать станции ITRF вблизи УС.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в сборе и анализе влияния изменения геотехнических параметров вблизи различных водных объектов на результаты геодинамических исследований площадок строительства УС для создания единой методики учета сезонных вариаций в результаты геодезических наблюдений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Баранов, В. Н. Рассмотрение вопроса нормативных документов в части высокоточного нивелирования / В. Н. Баранов, В. К. Андреев, А. В. Морозов. – Текст : электронный // Московский экономический журнал: электронный журнал. – URL: <https://qje.su/ru/storage/view/142379>. – 2022. – Т. 7, № 4. – С. 363–372. – DOI 10/55186/2413046X_7_4_210.

2 Баранов, В. Н. Вариации силы тяжести из-за влияния уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений / В. Н. Баранов, В. К. Андреев, А. В. Морозов. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 4. – С. 92–97. – DOI <https://doi.org/10.17513/use.37815>.

3 Баранов, В. Н. Вариации геодезических высот, вызванные колебаниями силы тяжести, осадков и уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений / В. Н. Баранов, А. В. Морозов. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 2. – С. 119–128. – DOI <https://doi.org/10.17513/use.38008>.

4 Морозов, А. В. Применение технологий лазерного сканирования в ТИМ и строительстве / А. В. Морозов. – Текст : непосредственный // Архитектура и строительство России. – 2024. – № 2. – С. 88–93.

5 Баранов, В. Н. Зависимость геотехнических параметров от сезона наблюдений на площадках строительства уникальных зданий и сооружений вблизи меандрирующих рек / В. Н. Баранов, А. В. Морозов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 5. – С. 39–49. – DOI [10.33764/2411-1759-2024-29-5-39-49](https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-5-39-49).