

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Государственный университет по землеустройству»  
(ГУЗ)

На правах рукописи

Морозов Артем Викторович



Разработка методики учета вариаций силы тяжести при строительстве  
уникальных сооружений

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание учёной степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Баранов Владимир Николаевич

Москва – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ И ТЕРМИНОЛОГИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ .....	10
1.1 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением классической аппаратуры (тахеометры и нивелиры).....	10
1.2 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением GPS/ГЛОНАСС-аппаратуры.....	16
1.3 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением аэрофотосъемочных систем. ....	20
1.4 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением сканеров.....	21
1.5 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением гравиметров .....	21
1.6 Прикладные научные исследования в области УС .....	22
1.7 Выводы по разделу 1.....	25
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ И СИСТЕМ ВЫСОТ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ГЕОДЕЗИИ И ГЕОДИНАМИКЕ .....	27
2.1 Физический и геометрический смысл систем высот.....	27
2.2 Разновидности систем высот .....	28
2.3 Виды деформаций .....	30
2.4 Виды вариаций силы тяжести и известные методы учета.....	32
2.4.1 Вариации силы тяжести из-за приливных явлений, атмосферы и тектонических факторов .....	32
2.4.2 Влияние уровня грунтовых вод и плотности грунтов на силу тяжести на локальном участке работ .....	34
2.4.3 Вариации вычисления поправки за промежуточный слой (редукция Буге) .....	41

2.4.4 Способ учета ВСТ в результаты высокоточного нивелирования через поправку в превышения через УОЛ .....	43
2.4.5 Способ учета ВСТ в результаты высокоточного нивелирования через ввод поправок в превышения за переход к разностям нормальных высот .....	45
2.5 Выводы по разделу 2.....	46
<b>3 РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ, НИВЕЛИРНЫХ, СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПУНКТАХ СЕТИ.....</b>	<b>47</b>
3.1 Гравиметрические наблюдения .....	47
3.1.1 Абсолютные измерения силы тяжести .....	47
3.1.2 Относительные измерения силы тяжести.....	57
3.1.3 Анализ результатов относительных гравиметрических измерений .....	60
3.2 Геометрическое нивелирование .....	66
3.3 Спутниковые наблюдения.....	66
3.4 Выводы по разделу 3.....	67
<b>4 МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....</b>	<b>68</b>
4.1 Учет вариации силы тяжести с помощью локальной гравиметрической карты на площадке строительства уникальных сооружений .....	70
4.1.1 Вычисление уклонов отвесных линий в плоскости первого вертикала и в плоскости меридиана при помощи палетки Еремеева .....	73
4.1.2 Вычисление высот квазигеоида (аномалий высот) на площадке строительства .....	76
4.2 Вычисление УОЛ и их разности по палетке Еремеева и ввод поправок в измеренное превышение.....	78

4.3 Вычисление поправки в измеренное превышение и их разности для перехода к разностям нормальных высот .....	80
4.4 Учет геотехнических параметров в результатах геодезических измерений .....	81
4.4.1 Анализ многолетних геотехнических наблюдений.....	81
4.4.2 Методика вычисления уровня грунтовых вод на пунктах ГДП .....	81
4.5 Доказательство коррелированности данных от сезона наблюдений и методика учета ВСТ.....	95
4.5.1 Методика учета ВСТ в исходный пункт ГДП.....	98
4.5.2 Апробация метода с помощью ГНСС-технологий.....	106
4.6 Дополнительные факторы, вызывающие изменение гидрогеологической нагрузки на прибрежные пункты ГДП и прогноз .....	124
4.7 Моделирование изменения силы тяжести по гидрологическим данным.....	128
4.8 Выводы по разделу 4.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ) Акт о внедрении результатов .....	153

## ВВЕДЕНИЕ

*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. [1, 28, 38, 48, 76, 85, 86].

*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 геодинамического 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 геодинамического 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 геодезия, 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 (Приложение А).

*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.

# 1 НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ И ТЕРМИНОЛОГИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Согласно действующим нормативным документам [19] и [61] для уникальных сооружений, средняя квадратическая погрешность (СКП) определения вертикального смещения должно быть не более 1,0 мм.

Если учесть, что измерения во всех циклах равноточны, то СКП определения высоты осадочной марки в слабом месте (наиболее удаленной марки от исходных реперов) не должна превышать

$$M_{Hi} \leq \frac{m_s}{\sqrt{2}} = 0,7 \text{ мм}, \quad (1.1)$$

где  $m_s$  – СКП определения вертикального смещения

$M_{Hi}$  – СКП определения высоты осадочной марки в слабом месте.

Если речь заходит о геодинамических полигонах, то выделяется иерархическая структура геодинамически активных зон согласно [60].

Согласно [43] определение деформаций грунтов оснований фундаментов зданий и сооружений проводится путем измерения вертикальных и горизонтальных смещений по системе деформационных марок, установленных на строительных конструкциях зданий и сооружений АС, с точностью 0,01 мм или выше.

Вышеперечисленные параметры точности согласуются с требованиями к критерию стабильности осадок фундаментов зданий, электроустановок и оборудования, которые не должны превышать 1 мм в год [58, 75].

## 1.1 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением классической аппаратуры (тахеометры и нивелиры)

На данный момент эпоха оптических нивелиров подходит к концу. Их стремительно заменяют цифровыми нивелирами.

Причина – экономия времени, возможность избежать ошибки считывания рейки исполнителем, а также высокоточность и почти что всепогодность комплекта реек и нивелира. Принципиальным отличием классического нивелирования от разрядного нивелирования является тот факт, что разрядное нивелирование предназначено для использования на территориях с искусственным покрытием. При этом погрешности за счёт проседания или выпучивания костылей (башмаков) и ножек штатива геодезического прибора не учитываются.

Классификация и все требования к выполнению классического нивелирования описаны в литературе [13, 27].

Рекомендации, содержащиеся в инструкции, тем не менее, актуальны и по сей день, но с небольшими поправками на оборудование, которое использует исполнитель, и места выполнения работ (например, замкнутое помещение с высокими требованиями к точности).

Нормы и правила разрядного нивелирования (более строгого аналога классического нивелирования) для гидротехнических сооружений приведены в [52].

Цифровые нивелиры позволяют точнее и быстрее выполнять работу, выставить требуемую точность выполнения измерений, исключают ошибку визирования наблюдателя.

Недостатки нормативной базы устраняют разработкой стандартов организации (СТО), таких как СТО 95 12029–2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства атомных станций [74], СТО СРО-Г 60542954 00007–2023. Геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений атомных станций, руководства [75], своды правил, восполняющие отмену ГКИНП 03-010-03 [13] и устаревшей инструкции по вычислению нивелировок [27].

Стоит отметить, что (ГНТА)-03-010-03 фактически утратил силу с 01.01.2018 на основании ч. 5 ст. 32 Федерального закона от 30.12.2015 № 431-ФЗ, а новой инструкции до сих пор нет, что создает некую абсурдность ситуации, состоящей в том, что регулирование происходящих строительных работ происходит все еще по старой инструкции.

Согласно [52] предусматривается следующая классификация «разрядного» нивелирования:

– 1-й разряд – проложение ходов прямо и обратно с использованием двух пар инварных реек и двух пар костылей (по мягкому грунту) и одной пары реек, и одной пары башмаков (по твердому покрытию);

– 2-й разряд – проложение ходов прямо и обратно с использованием одной пары инварных реек;

– 3-й разряд – проложение ходов в одном направлении с использованием одной пары инварных реек.

На основании [13] можно составить сводную таблицу с характеристиками геометрического нивелирования I и II классов и нивелирования 1–3-го разрядов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Характеристики геометрического нивелирования I, II классов и нивелирования 1, 2, 3-го разрядов

Характеристика	Класс точности				
	I класс	II класс	1-й разряд	2-й разряд	3-й разряд
Общие требования					
Число направлений нивелирования	2	2	2	2	1
Число линий в одном направлении	2	1	2 (1)	1	1
Длина визирного луча, м, не более	50	65	-	-	50
Средняя длина визирного луча, м	-	-	25	25	-
Высота луча над подстилающей поверхностью, м					
- как правило, не менее	0,8	0,5	0,8	0,8	0,3
- в отдельных случаях, не менее	0,5	0,3	0,5	0,5	-
Неравенство расстояний от нивелира до реек на станции, м, не более	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0
Накопление неравенств расстояний от нивелира до реек по секции, не более, м	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0
Продолжительность температурной стабилизации нивелира до начала измерений, мин	45	45	-	-	-
Предварительные установки для цифровых нивелиров					
Количество считываний по рейке, не менее	3	3	3	3	3
СКО считывания по рейке, мм <sup>2</sup>	0,10	0,14	0,08	0,08	0,14

Характеристика	Класс точности				
	I класс	II класс	1-й разряд	2-й разряд	3-й разряд
Контроль наблюдений на станции					
Количество измерений превышения на станции по одной линии <sup>3</sup>	2	2	2 (4)	2	2
Разность между двумя превышениями на станции, мм					
- для аналоговых нивелиров, не более	0,5	0,7	0,4	0,4	0,7
- для цифровых нивелиров, не более <sup>4</sup>	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4
Разность превышений задней пары костылей, мм	0,7	-	-	-	-
Контроль нивелирования по секции					
Разность превышений по левой и правой линиям в зависимости от длины $L$ в км, мм, не более					
- при числе станций на 1 км хода не более 15	$2\sqrt{L}$	-	-	-	-
- при среднем числе станций на 1 км хода более 15	$3\sqrt{L}$	-	-	-	-
Разность превышений прямого и обратного хода, в зависимости от длины $L$ в км, не более, мм					
- при числе станций на 1 км хода не более 15	$3\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$	-	-	-
- при среднем числе станций на 1 км хода более 15	$4\sqrt{L}$	$6\sqrt{L}$	-	-	-
Разность превышений прямого и обратного хода, в зависимости от числа станций $n$ , мм, не более	-	-	$0,3\sqrt{n}$	$0,5\sqrt{n}$	-
Контроль при уравнивании					
Допустимая невязка в замкнутых полигонах и по линиям между исходными пунктами:					
- в зависимости от длины $L$ в км, мм	$3\sqrt{L}$	$5\sqrt{L}$	-	-	-
- в зависимости от числа станций $n$ , мм	-	-	$0,3\sqrt{n}$	$0,5\sqrt{n}$	-
СКО случайная на 1 км нивелирного хода, мм/км	0,8	2,0	-	-	-
СКО систематическая на 1 км хода, мм/км	0,08	0,20	-	-	-
Допустимая невязка в замкнутых полигонах и по линиям в зависимости от числа станций $n$ , мм	-	-	-	-	$1,2\sqrt{n}$
СКО определения превышения на станции, мм	-	-	0,08	0,13	0,40
Примечания:					
1 Число линий в одном направлении нивелирования 1-го разряда: по временным костылям – 2, по стационарным маркам - 1.					
2 СКО считывания по рейке установлена в зависимости от допуска на разность между двумя превышениями на станции для аналоговых нивелиров.					
3 Количество измерений превышения на станции нивелирования 1-го разряда: по временным костылям – 2, по стационарным маркам – 4.					
4 Допустимое значение разности между двумя превышениями на станции для цифровых нивелиров установлено с учётом опыта выполнения высокоточных измерений.					

Принципиальное отличие электронного нивелирования заключается в том, что основными погрешностями при классическом (оптическом) нивелировании является погрешность визирования и соответствующие ей погрешности наведения, считывания и другие факторы, зависящие от остроты зрения наблюдателя. В случае с электронным нивелированием погрешность взгляда сведена к минимуму, однако все остальные погрешности (установка реек, температурная деформация реек, коробления реек, недокомпенсация нивелира, температурные погрешности и пр.) остаются практическими неизменными.

Методика выполнения работ по наблюдения за осадками и деформациями зданий и сооружений предполагает проложение ходов в три этапа:

– 1-й этап – проложение ходов геометрического нивелирования 1-го разряда по пунктам исходной высотной геодезической сети от пунктов геодинамического полигона;

– 2-й этап – проложение привязочных ходов к зданию от пунктов исходной высотной геодезической сети к сети осадочных марок здания (сооружения) – 2-й разряд;

– 3-й этап – проложение ходов по осадочным маркам здания (сооружения) – 3-й разряд.

При построении полигонометрических сетей тахеометрами или теодолитами должны соблюдаться требования [65], приведённые в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Требования при построении полигонометрических сетей

Показатель	Полигонометрия		
	IV класса	1-го разряда	2-го разряда
Предельная длина хода:			
- отдельного, км;	15	5	3
- между исходным пунктом и узловой точкой, км;	10	3	2
- между узловыми точками, км	7	2	1,5
Средняя квадратическая погрешность измерения угла (по невязкам в ходах), ...", не более	3	5	10
Угловая невязка в ходах или полигонах, с, не более ( $n$ - число углов в ходе или полигоне)	$5\sqrt{n}$	$10\sqrt{n}$	$20\sqrt{n}$

Показатель	Полигонометрия		
	IV класса	1-го разряда	2-го разряда
Периметр полигона, образованного полигонометрическими ходами в свободной сети, не более, км	30	15	9
Длина стороны хода: - наибольшая, м; - наименьшая, м	2000 250	800 120	350 80
Предельная относительная погрешность хода	$\frac{1}{25000}$	$\frac{1}{10000}$	$\frac{1}{5000}$
Число сторон в ходе, не более	15	15	15
<p>Примечания:</p> <p>1 В полигонометрической сети следует предусматривать минимальное число порядков, ограничиваясь, как правило, полигонометрией IV класса и 1-го разряда.</p> <p>2 Допускается при использовании светодалномеров увеличивать длины ходов и сторон хода полигонометрии 1-го и 2-го разрядов до 30 %.</p> <p>3 В ходах полигонометрии 1-го разряда длиной до 1 км и 2-го разряда длиной до 0,5 км допускается абсолютная линейная невязка 10 см.</p> <p>4 При числе сторон в ходе полигонометрии 1-го и 2-го разрядов более 15 дополнительно должны передаваться дирекционные углы с пунктов опорных геодезических сетей на отдельные стороны хода или определяться азимуты этих сторон из астрономических (гиротеодолитных) наблюдений со средней квадратической погрешностью (по внутренней сходимости), не превышающей 5" – для 1-го разряда и 10" – для 2-го разряда полигонометрии.</p>			

Углы в ходах полигонометрии следует измерять способом круговых приемов по трехштативной системе при соблюдении числа приемов, указанных в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Число приёмов в полигонометрии

Наименование оборудования	Число приёмов в полигонометрии		
	IV класса	1-го разряда	2-го разряда
Угловые измерения			
Тахеометры (теодолиты) Т1 и равноточные	4	2	1
Тахеометры (теодолиты) Т2 и равноточные	6	3	2
Тахеометры (теодолиты) Т5 и равноточные	-	-	3
Линейные измерения			
Тахеометры (светодальномеры)	3	2	1
Примечание – Измерение углов на пунктах полигонометрии при двух направлениях производится без замыкания горизонта.			

## 1.2 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением GPS/ГЛОНАСС-аппаратуры

При построении опорных геодезических сетей спутниковыми методом руководствуются [71].

Для оценки СКП взаимного положения смежных пунктов сети выполняется анализ уравненных векторов. Относительная ошибка определения вектора не должна превышать значений, прописанных в требованиях, предъявляемым к опорным геодезическим сетям.

Для работы на строительной площадке стоит необходимость перехода от общеземных координат, полученных при помощи спутниковых наблюдений, к системе координат площадки. Теоретические и практические аспекты этого раздела и геодинамики основаны на трудах Андреева В. К. [2].

Преобразования выполняются аффинным методом. Аффинные преобразования предполагают перенос начала системы координат (в точку  $x_0, y_0$  в исходной системе, соответствует точке  $u_0, v_0$  в выходной системе), поворот координатных осей на некоторый угол ( $\gamma$ ) и изменение масштаба ( $m$ ) в соответствии с формулой

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = m \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}. \quad (1.2)$$

В условиях избыточности исходных данных параметры преобразования  $m, \gamma, x_0, y_0, u_0, v_0$  вычисляются с применением метода наименьших квадратов по набору узловых точек, координаты которых известны в обеих системах « $x$ - $y$ » и « $u$ - $v$ ». После вычисления параметров рабочие уравнения преобразований обычно сводятся к выражениям

$$\begin{aligned} u &= Cx - Sy + p, \\ v &= Sx + Cy + q, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $C = m \cdot \cos \gamma$ ;

$S = m \cdot \sin \gamma$ ;

$$p = u_0 - m \cdot \cos \gamma \cdot x_0 + m \cdot \sin \gamma \cdot y_0;$$

$$q = v_0 - m \cdot \sin \gamma \cdot x_0 - m \cdot \cos \gamma \cdot y_0.$$

Метод аффинных преобразований универсален. Вместе с тем, параметры преобразования и получаемые результаты существенно зависят от количества, качества и взаимного расположения исходных пунктов. При благоприятных условиях трансформирование геодезических координат аффинным методом даёт приемлемые по точности результаты в пределах участка 10 на 10 км.

Спутниковые наблюдения выполняются в соответствии с требованиями ГКИНП (ОНТА)-01-271–03 [16] и ГКИНП (ОНТА)-02-262–02 [17].

Полевые работы по наблюдениям включают следующие процессы:

- подготовка оборудования к работе;
- установка станций на пунктах наблюдений, включение, инициализация;
- проведение спутниковых наблюдений;
- приём и сохранение данных наблюдений;
- предварительная обработка результатов наблюдений.

Перед началом полевых работ проводится подготовка оборудования к работе. Для спутниковых приёмников определяются рабочие параметры (условия наблюдений и режимы выполнения работ):

- режим работы приёмников;
- продолжительность сеанса измерений;
- угол отсечки по высоте (маска возвышения);
- интервал регистрации измерений (дискретность измерений).

Так же должно быть подготовлено вспомогательное оборудование (штативы, трегеры, оптические центриры).

У оптических центриров должна быть проведена поверка и юстировка оптики, у трегеров должны быть поверены круглые и горизонтальные уровни. Установка антенны спутникового приёмника над центром пункта осуществляется с применением центрировочного устройства.

Высота антенны над маркой центра измеряется дважды (до и после завершения сеанса наблюдений) с точностью 1–2 мм. Значения промеров и абрис установки антенны заносятся в карточку спутниковых наблюдений

Программы спутниковых наблюдений различаются в зависимости от класса точности наблюдений. В таблице 1.4 приведены основные сведения о типах спутниковой сети, требования к методикам и продолжительности наблюдений.

Таблица 1.4 – Характеристики спутниковых сетей

Технические требования	Тип спутниковой сети			
	исходный пункт	каркасная сеть	СГГС-1	СГГС-2
Предназначение пунктов	Связь с общеземной системой координат	Создание высокоточного геодезического обоснования, связь с государственной геодезической сетью	Сгущение сети пунктов до заданной плотности, связь с пунктами местной геодезической сети	Обеспечение текущих потребностей
Точность определения координат, см	1–2	1–2	1–2	1–2
Относительная ошибка определения линий, не грубее	1 : 1 000 000	1 : 500 000	1 : 150 000	1 : 150 000
Тип используемой аппаратуры (минимальные требования)	Многосистемная двухчастотная	Односистемная двухчастотная	Односистемная двухчастотная	Односистемная двухчастотная
Метод наблюдений	Лучевой с использованием измерений на пунктах ФАГС, ВГС, IGS	Сетевой с использованием комплекта приёмников	Сетевой с использованием комплекта приёмников	Сетевой с использованием комплекта приёмников
Продолжительность наблюдений, не менее	5 суток	2 сеанса по 3 часа	2 сеанса по 1,5 часа	2 сеанса по 1,5 часа
Продолжительность одного сеанса в зависимости от длины измеряемой линии, ч: – до 15 км; – от 15 до 30 км; – свыше 30 км	- - -	3 3–4 4 и более	1.5 1.5–2 4 и более	1.5 1.5–2 4 и более

По окончании наблюдений данные копируются на устройства длительного хранения информации – компакт-диск, жесткий диск компьютера и т. д. При этом рекомендуется создавать одну рабочую копию и одну резервную на разных физических дисках.

Дальше проводится предварительная обработка данных. Предварительная обработка выполняется с целью оперативной оценки качества измерений в ходе, сети или на отдельном объекте. По результатам предварительной обработки делается вывод о пригодности полевых материалов для окончательной обработки и получения готовой продукции либо о необходимости повторных или дополнительных наблюдений.

Предварительная обработка выполняется на полевой базе бригады. Оперативное выполнение предварительной обработки позволяет повысить качество полевых материалов путём отсеивания недопустимых результатов наблюдений и проведения дополнительных измерений.

Основными критериями контроля являются:

- разрешение неоднозначности по всем линиям сети;
- оценка точности по внутренней сходимости результатов обработки;
- сходимость результатов по замкнутым построениям в сети;
- сходимость с ранее выполненными измерениями и контрольными расстояниями между известными пунктами.

Предварительная обработка результатов спутниковых наблюдений и определение предварительных геоцентрических координат пунктов спутниковой сети может выполняться с использованием специализированного программного обеспечения фирмы-изготовителя спутниковых приёмников.

Средняя квадратическая ошибка определения плановых координат должна быть не более  $m = (5 + 5 \cdot 10^{-7} \cdot D)$  мм, где  $D$  – расстояние в метрах.

Для разностей высот значение ошибки принимается в 1,5 раза больше при расстояниях более 1 км и в два раза больше при расстояниях менее 1 км.

Допуск на разность двойных измерений устанавливается по правилу  $\Delta_{\text{доп}} = k \cdot m \cdot \sqrt{2}$  для двойных измерений и  $\Delta_{\text{доп}} = k \cdot m$  для уклонения от средних

значений при числе определений базовой линии больше 2. Значение  $k$  устанавливается равным 2,0, что соответствует доверительной вероятности 95 %. Примерно в 5 % случаев допускаются расхождения  $k > 2,0$ . Расхождения, соответствующие значениям  $k > 3$ , не допускаются. В этом случае необходимо выполнить повторные наблюдения.

Оценка точности измерений геодезической спутниковой аппаратурой выполняется по замкнутым фигурам (полигонам).

Допустимая невязка приращений координат вычисляется по формуле

$$W_{f, \text{доп.}} = k \cdot (m_1^2 + m_2^2 + m_3^2)^{1/2}, \quad (1.4)$$

где  $m_i$  – номинальная точность измерений по сторонам треугольника.

Фактическая невязка приращений координат рассчитывается по формуле

$$W_f = \sqrt{(W_{\Delta X})^2 + (W_{\Delta Y})^2 + (W_{\Delta Z})^2}, \quad (1.5)$$

где  $W_{\Delta X}$ ,  $W_{\Delta Y}$ ,  $W_{\Delta Z}$  – невязки по осям координат.

При этом допустимая погрешность измерения длины определяется по формуле:

– для линий длиной менее 5 км  $m_{\text{доп}} = (5 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot D)$  мм, где  $D$  – измеряемое расстояние в метрах;

– для линий длиной более 5 км  $m_{\text{доп}} = (5 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$  мм, где  $D$  – измеряемое расстояние в метрах.

После предварительной обработки и проверки всех результатов наблюдений производится окончательная обработка результатов наблюдений. Обработка проводится в специализированном программном обеспечении, поставляемом с оборудованием (например, Topcon Tools, Magnet Tools, Leica Geo Office и др.).

### 1.3 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением аэрофотосъемочных систем

Существует следующая нормативная документация для аэрофотосъемки:

– Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Часть III. Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства

[64] (рассматриваются вопросы использования фотографических систем для целей гидрографии);

– ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования [21];

– ГОСТ Р 58854–2020. Фотограмметрия. Требования к созданию ориентированных аэроснимков для построения стереомоделей застроенных территорий (с Поправкой) [20].

#### 1.4 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением сканеров

На момент написания диссертации создано несколько вариантов национальных стандартов в области регулирования лазерного сканирования в строительстве [24, 25]. Однако методик выполнения работ по наземному лазерному сканированию в нормативной документации нет (в отличие от мобильного сканирования [22, 23]).

В основном это связано с относительно недавним массовым применением сканеров на территории России, их дороговизной и попыткой соединить технологии информационного моделирования (ТИМ) с результатами сканирования (исходной информацией).

#### 1.5 Нормативные документы для инженерных изысканий с применением гравиметров

Проведение гравиметрических наблюдений является дополнительным компонентом к высокоточному геометрическому нивелированию.

Цель гравиметрических наблюдений – выявление локальных вариаций ускорения силы тяжести, обусловленных изменением масс в теле Земли и вертикальным смещением земной поверхности.

Основными действующими документами по наблюдениям гравиметрами относительными и абсолютными являются:

– ГОСТ 13017–83. Гравиметры наземные. Общие технические условия [18];

– ГКИНП (ГНТА)-04-252–01. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. Требования к высокоточным сетям. Абсолютные измерения ускорения силы тяжести баллистическими гравиметрами [15];

– ГКИНП (ГНТА)-04-122-03 Инструкции по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России [14].

Согласно РТМ 68-6-94. Работы гравиметрические наземные высокоточные и морские [59] гравиметрическая сеть, состоящая из основных гравиметрических пунктов I класса и пунктов I класса, опирающихся на ГФГС и предназначенные для распространения принятой гравиметрической системы на всю территорию России, должны определяться со средней квадратической погрешностью определения ускорения силы тяжести на пункте из уравнивания не более 0,05 мГал или 50 мкГал.

С другой стороны, согласно [14] гравиметрические пункты на площадке строительства можно отнести к высокоточной государственной гравиметрической сети, которые представляют собой совокупность закрепленных на местности и гравиметрически связанных между собой пунктов, на которых выполняют относительные или абсолютные измерения ускорения силы тяжести и осуществляют определение высот и координат этих пунктов. Принято разделять такие сети:

- на государственную фундаментальную гравиметрическую сеть (ГФГС);
- государственную гравиметрическую сеть I класса (ГГС-1).

## 1.6 Прикладные научные исследования в области УС

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

Теоретические и практические аспекты изменения уклонения отвеса на пунктах ГДП вблизи водохранилищ изучены в научных трудах Бузука В. В., Вовка И. Г., Гагагиной 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» [10, 34].

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

Маркович К. И., Шароглазова Г. А. проводили исследования по учету ВСТ на Белорусском ГДП. Некоторые поправки в нивелирных ходах протяженностью 40 км превышали 10 мм, что говорит 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 и деформациями. Примерный период – полгода. Достоверным контролем изменения геотехнической ситуации в таком случае является проведение совместных циклов геотехнических и гравиметрических наблюдений и комплексный анализ и учет полученных данных в результатах мониторинговых геодезических наблюдений на пунктах ГДП.

Диссертационная работа Вершининой Ю. В. по исследованию деформаций на ГДП нефтегазовых месторождений подтверждает сезонность изменения высот грунтовых реперов, расположенных вблизи р. Дон, однако контур исследований не охватывает изменение силы тяжести [9].

Дополнительно были рассмотрены геодинамические исследования Устинова А. В., Косарева Н. С. (Загорская ГАЭС), Мазурова Б. Т., Непоклонова В. Б., Суздалева А. С., Мельникова А. Ю., Трофимова Д. А. Шестакова Н. В., Герасимова Г. Н., Герасименко М. Д., Костицына В. И., Серебряковой Л. И [31, 37, 80, 87].

В работе Спесивцева А. А. [73] присутствует глава о влиянии гидрологической нагрузки на ВСТ. Однако приведенные им значения изменений (до 10 мкГал) расходятся с полученными экспериментальными данными и требованиями инструк-

ции 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. [45, 62].

За рубежом подобными научными исследованиями занимались Tapley B. D., Watkins M. M., J. C. Ries, McCarthy D. D., Hughes. C. W., Bingham R. J., Smith D. A., Z. Li [91, 92, 95, 98, 101, 102].

В статье Устинова А. В. [81] приведены результаты наблюдений за глубинными и грунтовыми реперами с помощью автоматизированной связки тахеометра Leica TM30, призменных отражателей и программы Leica GeoMoS.

Результаты показали, что максимальный подъем грунтовых и глубинных реперов, расположенных вблизи р. Кунья, наблюдался в периоды с мая по июль. Причинами тому могут быть различные факторы, не последними из которых являются сезонные и атмосферные гидронагрузки.

Эксперимент показал, что максимальный подъем, грунтовых и глубинных реперов, расположенных вблизи р. Кунья, наблюдался в периоды с мая по июль.

Причинами тому могут быть различные факторы, не последними из которых являются сезонные и атмосферные гидронагрузки. Результаты анализа прикладных исследований авторов в области уникальных сооружений целесообразно представить в виде блок-схемы для наглядного отображения (рисунок 1.1).

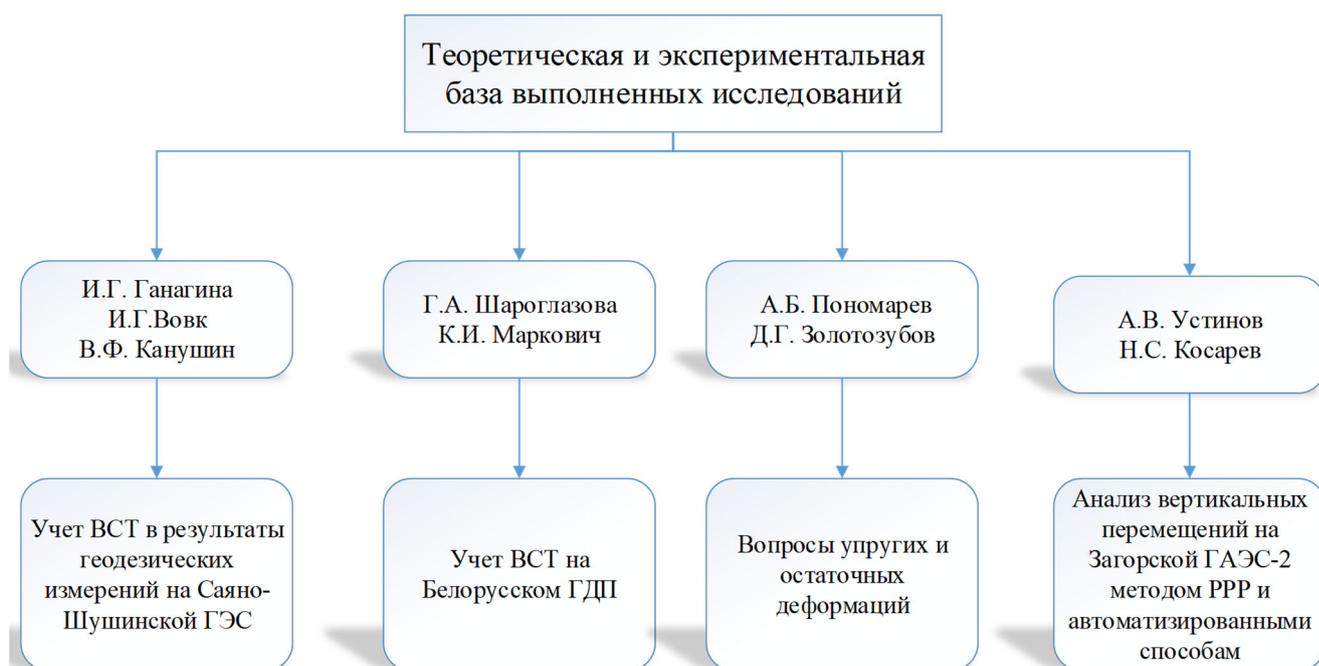


Рисунок 1.1 – Блок-схема результатов теоретических и экспериментальных исследований авторов в области уникальных сооружений.

### 1.7 Выводы по разделу 1

На основании ч. 5 ст. 32 Федерального закона от 30.12.2015 № 431-ФЗ, вступившего в силу от 01.01.2018, были отменены следующие нормативные документы:

- ГКИНП (ГНТА)-03-010–03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов;
- ГКИНП (ГНТА)-04-252–01. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. Требования к высокоточным сетям. Абсолютные измерения ускорения силы тяжести баллистическими гравиметрами;
- ГКИНП (ГНТА)-04-122–03. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России.

Однако для всех вышеперечисленных документов до сих пор нет замены.

Фактически, исполнитель работ должен прописывать в техническом задании, проекте производства геодезических работ или программе работ устаревшие нормативные документы и согласовывать их с заказчиком.

Лазерные сканеры на сегодняшний день имеют слабую нормативную базу, их использование ограничено несколькими нормативными документами в области мобильного сканирования, однако высокая точность и информативность полученных данных, а также переход строительной отрасли на ТИМ позволяет спрогнозировать их применение в будущем и появление новых регламентирующих документов.

При использовании спутникового оборудования почти вся нормативная документация актуальная, но есть вопросы к самим нормативным документам. Некоторые пункты ГКИНП (ОНТА)-01-271-03 являются сомнительными в современных реалиях, а метод PPP до сих пор не освещен должным образом в НТД.

С массовым применением цифрового нивелирования необходимы нормативные документы, учитывающие специфику и точность работ цифрового нивелира. Одним из таких документов, содержащих обобщенную информацию о современных методах определения деформаций с помощью цифрового и оптического нивелирования, лазерного сканирования и спутниковых методов, является применение СТО СРО-Г 60542954 00007–2023, но это стандарт организации.

Более подробно проблемы современной научно-технической литературы в области высокоточного нивелирования рассмотрены в статье [6].

Изучение прикладных исследований в области уникальных сооружений выявило интерес к исследованию деформаций и силы тяжести на ГДП как со стороны зарубежных, так и российских авторов и подтверждает актуальность выбранного направления исследования.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ И СИСТЕМ ВЫСОТ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ГЕОДЕЗИИ И ГЕОДИНАМИКЕ

### 2.1 Физический и геометрический смысл систем высот

В геодезии системы высот принято разделять на две категории:

– в физическом смысле (работа по перемещению тела единичной массы против действия силы тяжести).

– в геометрическом смысле (геодезические высоты)

Высоты первой категории – это так называемые нивелирные гипсометрические высоты, которые подразделяют на три вида:

– ортометрические;

– нормальные;

– динамические.

Последними ключевыми работам в рамках изучения систем высот являются работы Marcelo Santos, Ismael Foroughi [99] и Попадьева В. В. [55, 56], в которых исследована динамика изменений расстояния от геоида (ортометрическая высота) до пола теоретического тоннеля вдоль смоделированной аномальной массы (будь то вода или гора).

Изменение ортометрической высоты составило 2 см на 1 км, это неприемлемая точность при высокоточных работах.

На сегодняшний день до сих пор идут споры касательно ортометрических, нормальных и нормально-ортометрических высот. У каждой из перечисленных есть свои преимущества и недостатки. Ортометрические высоты понятны и наглядны, но при этом их невозможно определить. Нормальные высоты легко вычислить, но при этом они не имеют ничего общего с реальной силой тяжести. Нормально-ортометрические высоты призваны хоть как-то объединить эти системы.

Альтернативой для оценки современных движений земной поверхности (СДЗП) могут служить геодезические высоты.

## 2.2 Разновидности систем высот

Перед выполнением работ по определению высот деформационных марок, пунктов опорной геодезической сети (ОГС) и ГДП УС, выбор отсчетной поверхности и системы высот является первостепенной задачей. Фактически, это фундамент для всех последующих циклов наблюдений на строительной площадке. Геометрическое представление систем высот представлено на рисунке 2.1.

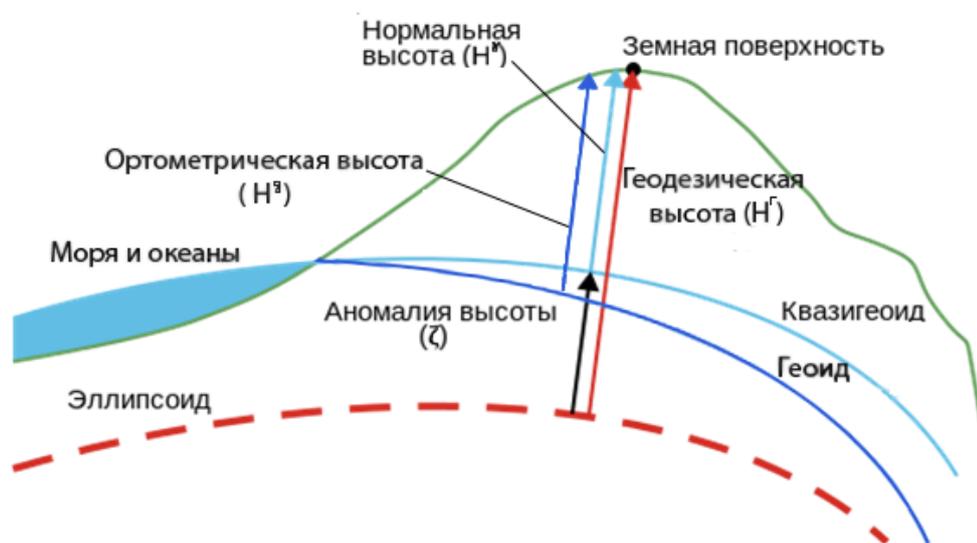


Рисунок 2.1 – Основные отсчетные поверхности и системы высот в геодезии

Для определения точек над эллипсоидом используется геодезическая высота ( $H^Г$ ) – это расстояние (которое, в том числе, является и нормалью к поверхности), отсчитываемое от поверхности выбранного нами эллипсоида (общеземного или референц-эллипсоида) до определяемой точки. Это высота в геометрическом смысле и ее определение не связано с силой тяжести.

Геодезическая высота ( $H^Г$ ) имеет только геометрический смысл и определяется по наблюдениям ГНСС. Этот факт является ее главным преимуществом, относительно традиционных систем высот, связанных с силой тяжести.

Геодезические высоты и превышения возможно вычислить и по результатам тригонометрического или астрономо-геодезического нивелирования, с использованием аномалии высоты.

Для связи нормальных и геодезических высот существует соотношение

$$H^{\Gamma} = H^{\nu} + \zeta, \quad (2.1)$$

где  $H^{\Gamma}$  – геодезическая высота точки;

$H^{\nu}$  – нормальная высота;

$\zeta$  – аномалия высоты.

Ортометрическая высота ( $H^g$ ) – это расстояние, отсчитываемое по силовой линии от поверхности геоида до определяемой точки.

Ортометрическая высота чаще всего применяется в повседневной жизни, так как является высотой от уровня моря и поэтому наиболее понятна. Однако в геодезии ортометрическую высоту вычислить почти невозможно, для ее вычисления необходимо знать распределение масс внутри Земли вдоль трассы нивелирования.

Нормальная высота ( $H^{\nu}$ ) – это высота над уровенным эллипсоидом в нормальном поле силы тяжести Земли. Широко применяется в геодезических работах. Нормальные высоты практически не зависят от выбора эллипсоида и определяются по результатам измерений, выполненных на физической поверхности Земли. Однако они зависимы от выбора начальной точки, от которой выполняется нивелирование (тригонометрическое, геометрическое) и идет счет разности потенциалов (то есть геопотенциальных чисел).

Эта высота была предложена в 1945 г. Молоденским М. С. на территории Советского Союза и используется по сей день.

Следует отметить, что нормальные высоты на уровенной поверхности, в отличие от ортометрических высот, изменяются лишь в системе «север-юг», то есть зависят только от широты места измерений. Однако даже эти изменения могут вызвать значительные перепады нормальных высот. Ярким примером служит озеро Байкал, у которого разность урезов воды в южных и северных частях составляет 90–110 мм [47].

Динамическая высота ( $H^d$ ) – это высота, которая не изменяется на одной и той же уровенной поверхности и является геопотенциальным числом, переведенным к линейному виду [45]. Динамические высоты имеют некоторые отличия от нормальных и ортометрических. В районах с равнинной местностью разность нормальных и динамических высот составляет 1–5 м.

Динамические высоты в геодезии используют для передачи высот, когда нет данных о расстоянии между уровенными поверхностями.

Аномалия высоты ( $\zeta$ ) – это высота, которая характеризует несовпадение реального и нормального гравитационных полей, именно поэтому нормальная высота  $H^N$  не совпадает с геодезической  $H^G$ . Аномалия высоты является небольшой величиной, поскольку нормальный потенциал выбирает близким к действительному. Поверхность квазигеоида – это поверхность, образуемая нормальными высотами, проведенными по нормали к уровенному эллипсоиду от всех точек земной поверхности. Из этого можно сделать вывод, что квазигеоид отличается от эллипсоида на аномалию высоты [62].

### 2.3 Виды деформаций

В статье [44] деформографы в период наблюдений с 1970 по 1991 г. продемонстрировали сезонность деформаций. Авторы разделили их на две общепринятые категории – упругие и остаточные и привязали изменения к температуре. Для УС, на котором выполнялось исследование, температурные изменения между сезонами составляют порядка  $10^\circ \text{C}$ , что является небольшим изменением.

Общую формулу суммарной деформации можно представить следующим образом

$$DEF_{\Sigma 1} = DEF_{\text{упр}} + DEF_{\text{ост}}, \quad (2.2)$$

где  $DEF_{\Sigma 1}$  – суммарная деформация пункта за один цикл;

$DEF_{\text{упр}}$  – деформация, вызванная сезонными колебаниями;

$DEF_{ост}$  – деформация, не исчезающая после разгрузки элемента, т. е. после сил упругих деформаций.

На этапе нулевого (в некоторой литературе 1-го цикла) грунт и соответственно пункт будут претерпевать деформации, представленные формулой (2.2) и рисунком 2.2.

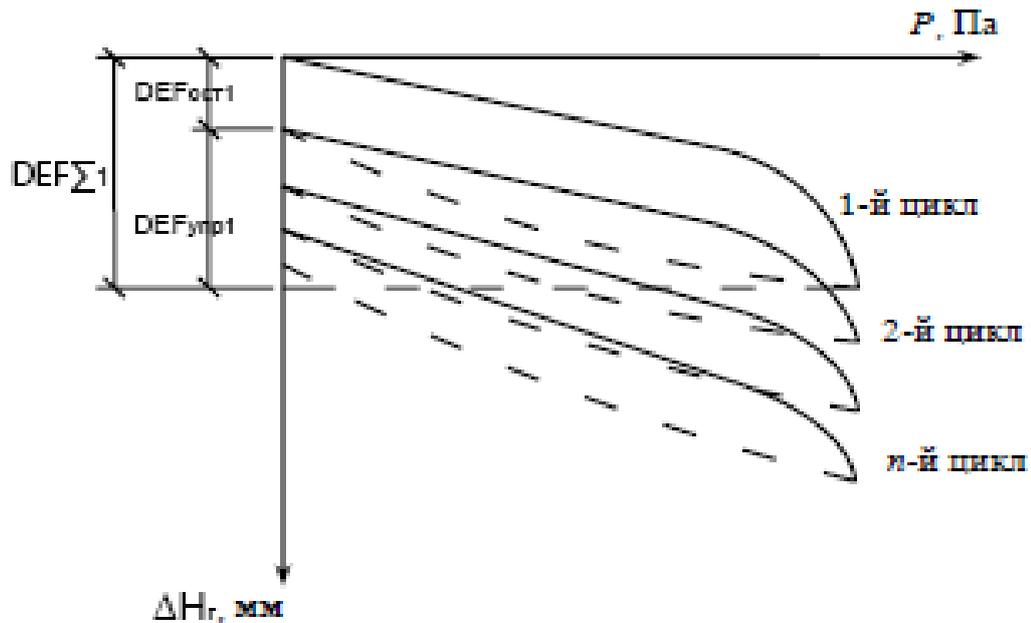


Рисунок 2.2 – Модель деформации пункта ГДП в результате сезонных колебаний

Часто уплотнение грунтов под тяжестью тела носит равномерный характер, с малой скоростью и постепенным затуханием осадки. Такие вертикальные деформации принято называть осадками уплотнения ( $DEF_{пл}$ )

$$DEF_{\Sigma 1} = DEF_{упр} + DEF_{ост} + DEF_{пл} . \quad (2.3)$$

## 2.4 Виды вариаций силы тяжести и известные методы учета

### 2.4.1 Вариации силы тяжести из-за приливных явлений, атмосферы и тектонических факторов

Современные гравиметры самостоятельно вводят поправки за приливные явления (лунно-солнечные вариации), которые могут достигать 180 МкГал – для Луны и 100 МкГал – для Солнца, что в итоге дает влияние порядка 250 мкГал [4, 78, 88].

Методика учета неприливных воздействий силы тяжести на пунктах Государственной фундаментальной гравиметрической сети Российской Федерации (ГФГС) представлена в диссертационной работе Чистяковой Е. А. [85].

Еще одним фактором, вызывающим заметные ВСТ, является землетрясение. В 2004 г. вблизи Северной Суматры девятибалльное землетрясение вызвало максимальные квазиволновые ВСТ порядка 800 МкГал, а после землетрясения в Индонезии с магнитудой 8,7 амплитуда повышения силы тяжести составила 560 мкГал, после чего наблюдалось резкое понижение на 620 мкГал.

ВСТ из-за землетрясений представлены в работах Хаина В. Е. и Халилова Э. Н. [83]. Отмечается, что перед и после Хайченского землетрясения в Китае с магнитудой 7,3 баллов в 1975 г. наблюдалось изменение силы тяжести до 350 МкГал.

По полученным данным можно построить график зависимости магнитуды от периода квазиволновой вариации силы тяжести (рисунок 2.3).

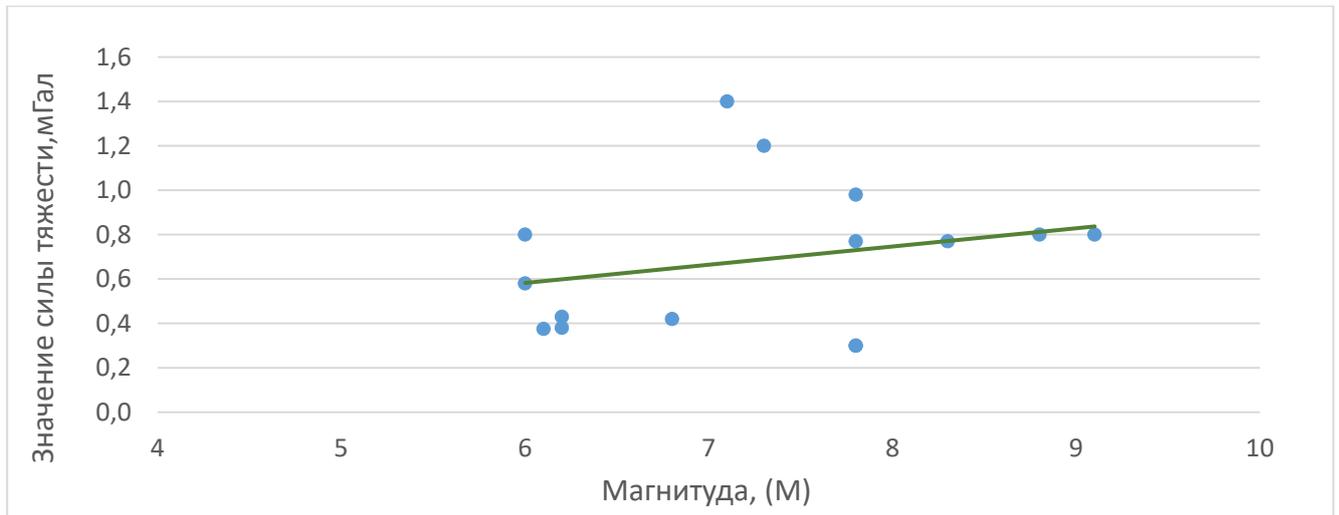


Рисунок 2.3 – График зависимости амплитуды квазиволновой вариации от магнитуды землетрясения

По многократным абсолютным измерениям в 1976–1990 г. в Новосибирске увеличение силы тяжести составило 50 мкГал.

Принято считать, что такие изменения произошли вследствие сдвига Тихоокеанской литосферной плиты.

Вариации атмосферных масс вследствие климатических изменений также относятся к явлениям, вызывающим ВСТ и деформации грунтов. Достаточно полно эта проблема освещена Юзефовичем А. П. [88].

Аномальные массы атмосферы при увеличении давления приводят к уменьшению силы тяжести и наоборот.

Распределение атмосферного эффекта на поверхности Земли невелико и составляет порядка 5 мкГал (уменьшается от лета к зиме).

В инструкции по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России [15] приведена формула учета влияния атмосферы

$$\Delta g_a = K (B_a - B_{H\nu}) \text{ мкГал}, \quad (2.4)$$

где  $B_{H\nu}$  – значение нормального для данного пункта атмосферного давления, в мм рт. столба;

$B_a$  – средняя величина атмосферного давления на пункте во время данной серии наблюдений, в мм рт. столба;

$K = 0,4$  мкГал на мм рт. столба.

Если  $B_a$  и  $B_{H^Y}$  выражены в миллибарах, то коэффициент  $K$  равен 0,3 – рекомендован МАГ, 1983 г., резолюция № 9.

Нормальное давление  $B_{H^Y}$  определяется по формуле

$$B_{H^Y} = 760,0 \cdot \left( \frac{288,15 - 6,5H^Y}{288,15} \right)^{5,2559} \text{ мм. рт. столба.} \quad (2.5)$$

#### 2.4.2 Влияние уровня грунтовых вод и плотности грунтов на силу тяжести на локальном участке работ

На сегодняшний день существует множество поправок в результаты гравиметрических наблюдений. Учетные поправки представлены в 0.

Если необходимо редуцировать силу тяжести на геоид, то необходим вертикальный градиент силы тяжести  $\left(\frac{dg}{dH}\right)$ .

Если есть измеренное значение силы тяжести  $g_{\text{изм}}$ , то силу тяжести на геоиде  $g_0$  можно получить разложением в ряд Тейлора, отбрасывая нелинейные члены

$$g_0 = g_{\text{изм}} - \left(\frac{dg}{dH}\right). \quad (2.6)$$

Однако редуцирование на геоид требует плотности распределения топографических масс.

Для наших прикладных целей, достаточно использовать нормальный градиент силы тяжести (использовать геодезическую высоту  $H^{\Gamma}$ ), то есть использовать нормальный вертикальный градиент силы тяжести  $\left(\frac{d\gamma}{dH}\right)$  вместо  $\left(\frac{dg}{dH}\right)$  [26].

– *Аномалия Буге*. Основной смысл редукции Буге состоит в исключении топографических масс, то есть масс между геоидом и физической поверхностью Земли.

Согласно [26] этот слой можно назвать пластиной Буге (рисунок 2.4).

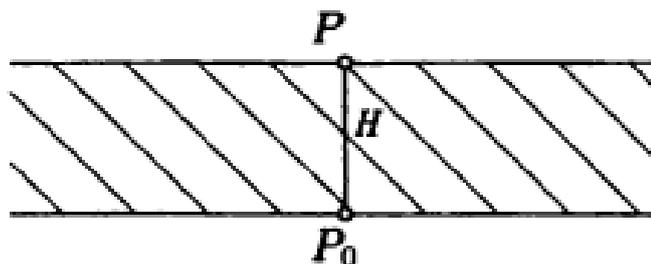


Рисунок 2.4 – Пластина Буге

Чтобы вычислить аномалию Буге, необходимо из измеренной величины силы тяжести ( $g_{\text{изм}}$ ) вычесть притяжение топографических масс.

– *Аномалия Фая или поправка за рельеф.* На силу тяжести оказывают влияние массы, расположенные как ниже, так и выше пункта наблюдений. Для учета этих влияний вычисляют поправку за рельеф, тем самым приводя все к одному плоскому уровню.

Тогда поправка за притяжение рельефа в ( $g_{\text{изм}}$ ) будет равна

$$\Delta g_P = G\delta \iint_{\sigma} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right) d\sigma, \quad (2.7)$$

где  $\sigma$  – элемент площади на поверхности;

$r_0$  – горизонтальное проложение отрезка  $r$ .

В 3.1.3 и на рисунках 3.4–3.6 продемонстрировано изменения уровня грунтовых вод и силы тяжести на гравиметрических пунктах.

Также немаловажным фактом является плотность грунта. Плотность грунта зависит от таких факторов:

- минеральный состав;
- пористость;
- влажность.

При увеличении влажности растет и плотность. Максимальная плотность возможна при полном заполнении пор водой.

Наблюдается обратная зависимость у пористости. Чем она больше, тем значение плотности будет меньше. Характеристики песчаных грунтов в зависимости от этих параметров представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значение плотности песчаного грунта в зависимости от влажности

Название грунта	Состояние грунта	Пористость	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	W, %	$\rho_{\text{выч}}$ , г/см <sup>3</sup>
Песок гравийный	водянистый	плотный	1,85	13	2,09
		средняя плотность	1,65	13	1,86
		рыхлый	1,53	13	1,73
	сухой	плотный	1,85	5	1,94
		средняя плотность	1,65	5	1,73
		рыхлый	1,53	5	1,61
Песок крупный	водянистый	плотный	1,82	13	2,06
		средняя плотность	1,63	13	1,84
		рыхлый	1,51	13	1,71
	сухой	плотный	1,82	5	1,91
		средняя плотность	1,63	5	1,71
		рыхлый	1,51	5	1,59
Песок средней крупности	водянистый	плотный	1,78	13	2,01
		средняя плотность	1,60	13	1,81
		рыхлый	1,50	13	1,70
	сухой	плотный	1,78	5	1,87
		средняя плотность	1,60	5	1,68
		рыхлый	1,50	5	1,58
Песок мелкий	водянистый	плотный	1,70	15	1,96
		средняя плотность	1,50	15	1,73
		рыхлый	1,38	15	1,59
	сухой	плотный	1,70	7	1,82
		средняя плотность	1,50	7	1,61
		рыхлый	1,38	7	1,48
Песок пылевой	водянистый	плотный	1,65	16	1,91
		средняя плотность	1,43	16	1,66
		рыхлый	1,32	16	1,53
	сухой	плотный	1,65	8	1,78
		средняя плотность	1,43	8	1,54
		рыхлый	1,32	8	1,43

Примечания:  
1  $\rho_0$  – значение плотности грунта при влажности 0%,  
2 W – влажность, в %,  
3  $\rho_{\text{выч}}$  – вычисленное значение плотности с учетом пористости и влажности.

Дополнительную информацию о распределении масс, типов грунтов и плотностей могут дать геофизические испытания на площадке.

Проводят следующие геофизические исследования:

- сейсмический каротаж;
- метод естественной радиоактивности (гамма-каротаж или ГК);
- плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-п).

Геофизические исследования проводятся на этапе подготовки площадки строительства УС. Мониторинговые наблюдения в этот момент не проводятся.

Интерес представляет из себя радиоактивный каротаж методами естественной радиоактивности (ГК) и плотностного гамма-гамма-каротажа (ГГК-п). Каротаж скважин выполнялся :

- для предварительной оценки литологического состава грунтов;
- определения физических свойств пород/грунтов (плотность в естественном залегании, естественная радиоактивность);
- изучения распределения этих параметров на исследуемом участке.

В результате проведенного ГК были получены следующие данные на территории площадки:

- глины залегают на глубине от первых метров до 20 м. Мощность составляет 0,5–2,0 м;
- пески пылеватые (илистые): глубина залегания от первых метров до 30 м. Мощность составляет 2,0–15 м;
- пески (мелкие, средней крупности, крупные): глубина залегания от первых метров до 49 м. Мощность: 2–31 м;
- глинистые пески: глубина залегания от первых метров до 30 м. Мощность: 5,0 м.

С учетом естественной радиоактивности грунты можно разделить на группы следующим образом:

- грунты с высокой естественной радиоактивностью (150–210 имп/с): глины;
- грунты со средней естественной радиоактивностью (100–150 имп/с): пески пылеватые, пески мелкие, пески глинистые;
- грунты с низкой естественной радиоактивностью (50–100 имп/с): пески средней крупности и крупные.

*Плотностной гамма-гамма каротаж (ГГК-п)*

Интенсивность рассеянного гамма-излучения, регистрируемая детектором, зависит от плотности пород. По результатам ГГК-п грунты площадки строительства можно разделить по значениям плотности в естественном залегании на следующие группы:

– грунты со средней плотностью (1,9-2,0 г/см<sup>3</sup>): пески, пески пылеватые, пески глинистые;

– грунты с низкой плотностью (менее 1,9 г/см<sup>3</sup>): глины, суглинки, супеси.

Определение плотности проводится послойно.

Результаты плотности грунтов с использованием плотностного гамма-гамма каротажа (ГГК-п) в скважине в центре площадки представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты определения плотности грунтов в скважине в центре площадки размещения УС по данным ГГК-п

Литологический состав	Глубина, м		Мощность слоя, м	$\ln(I_{\gamma\gamma}^{10}/I_{\gamma\gamma}^{25})$ (в условных единицах)	$\ln(I_{\gamma\gamma}^{10}/I_{\gamma\gamma}^{25})$ (в условных единицах)	Плотность грунта в естественном залегании, г/см <sup>3</sup>
	Кровля	Подошва				
Суглинок	0,80	4,00	3,20	3,09	1,13	1,85
Песок мелкий с глиной	4,00	7,20	3,20	2,69	0,99	1,83
Песок мелкий	7,20	12,50	5,30	4,93	1,59	1,90
Песок пылеватый	12,50	14,80	2,30	5,42	1,69	1,93
Песок мелкий	14,80	24,20	9,40	5,61	1,72	1,92
Песок средний	24,20	34,20	10,00	5,93	1,78	1,94
Песок мелкий	34,20	36,50	2,30	5,92	1,78	1,93
Песок средний	36,50	56,44	19,94	6,01	1,79	1,94
Песок от мелкого до среднего	56,44	80,80	24,36	6,00	1,79	1,95
Песок средний	80,80	85,80	5,00	6,16	1,82	1,93
Гравелистый песок	85,80	102,50	16,70	6,22	1,83	1,96
Песок средний	102,50	105,00	2,50	6,19	1,82	1,94
Гравелистый песок	105,00	108,60	3,60	6,65	1,90	1,96

Для того, чтобы получить значения плотности грунта, измеренные методом плотностного гамма-гамма-каротажа, используются значения параметров, определенные в лабораторных условиях на образцах керна, представленных в таблице 2.2.

$$\ln(I_{\gamma\gamma}^{10}/I_{\gamma\gamma}^{25}) = A \cdot \rho_{\text{л}} + B, \quad (2.8)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты линейного уравнения  $y = B \cdot x + A$ ;

$I_{\gamma\gamma}^{10}$  и  $I_{\gamma\gamma}^{25}$  – измеренные значения вторичного гамма-излучения пород зондами длиной 10 см и 25 см;

$\rho_{\text{л}}$  – плотность пород в естественных условиях, полученная лабораторными методами.

Корреляционное уравнение имеет вид

$$p = A + B \ln(I_{\gamma\gamma}^{10}/I_{\gamma\gamma}^{25}). \quad (2.9)$$

Что касается уровня грунтовых вод, то в зависимости от их природы различают следующие:

- кратковременные (от пары часов до пары суток);
- сезонные;
- долгопериодические.

Наибольший интерес представляют из себя сезонные колебания, поскольку чаще всего работы по деформационному мониторингу, наблюдениям на ГДП и опорной сети проводятся с одинаковой периодичностью.

Используя данные таблицы 2.1 и предполагая, что слой грунтовых вод представляет из себя пластину определенной массы и плотности (проводим аналогию с формулой (2.7)), получаем суммарное изменение силы тяжести, вызванное изменением уровня грунтовых вод и влажности грунта

$$\Delta g_{\text{Б}} = 2\pi G(\delta_{\text{п}}H_{\text{п}} + \delta_{\text{в}}H_{\text{в}}), \quad (2.10)$$

где  $\Delta g_{\text{Б}}$  – поправка за влияние топографических масс (аномалия Буге);

$\delta_{\text{п}}$  – плотность преобладающего грунта (используя таблицу 2.2);

$\delta_{\text{в}}$  – плотность водоносного слоя. Для чистой воды плотность 1,00 г/см<sup>3</sup> морской воды 1,03 г/см<sup>3</sup>;

$H_{\text{в}}$  – общая толщина водоносного слоя, см;

$H_{\text{п}}$  – общая толщина грунта над поверхностью точки наблюдения, см;

$G$  – гравитационная постоянная в системе CGS  $6.67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-2}$ .

Формула (2.10) представляет упрощенный и наиболее реальный вариант вычисления влияния грунтовых вод на силу тяжести. Поскольку глубина пьезометрических скважин ограничена величиной порядка 30–35 м.

В случае более детальной информации по водоносному слою и грунту формулу (2.10) можно представить

$$\Delta g_B = 2\pi G(\delta_{\Pi} H_{\Pi} + \delta_B H_B), \quad (2.11)$$

При вычислении постоянных коэффициентов и представления общего варианта при чередовании слоев, формула (2.11) примет вид

$$\Delta g_B = 0.42 \left( \sum_{\Pi=1}^m \delta_{\Pi} H_{\Pi} + \sum_{B=1}^k H_B \delta_B \right). \quad (2.12)$$

Общую толщину грунта над поверхностью точки наблюдения можно вычислить как разность высоты  $H$  точки наблюдений с толщиной водоносного слоя (рисунок 2.5).

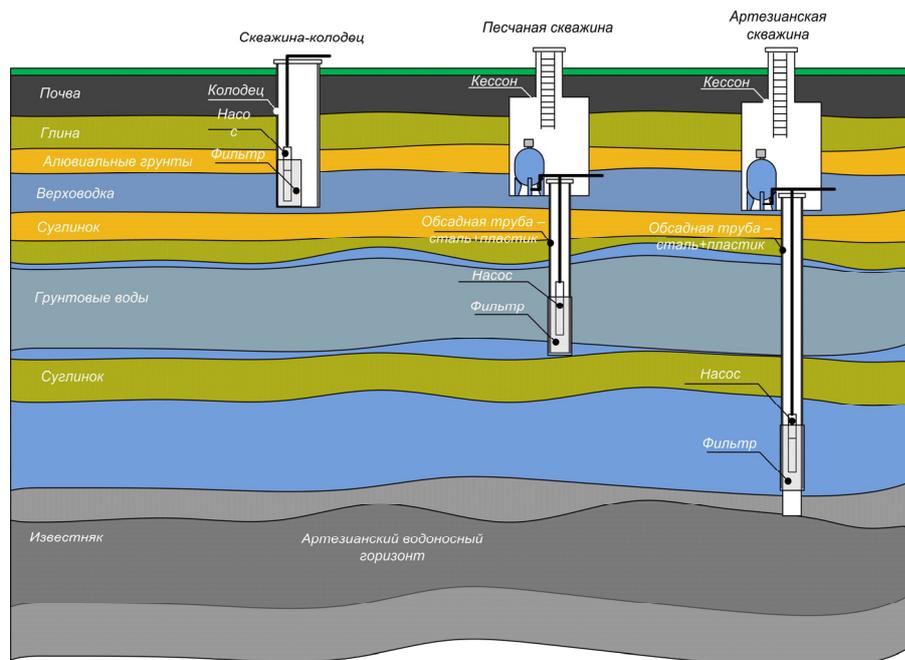


Рисунок 2.5 – Схема обозначения типов скважин и толщин водоносного слоя и грунта

Если речь идет не об плоской пластине, а сферической, то необходимо использовать коэффициент  $4\pi$ . В литературе [46] поправку с таким коэффициентом называют поправкой Прея.

Зарубежное исследование Toshiyuki Tanaka [100] посвящен вариациям силы тяжести при влиянии снега, осадков и грунтовых вод. Также в этом исследовании приведен метод высокоточного (порядка 1 мкГал) учета вариаций силы тяжести гидрологического происхождения с помощью двух гравиметров.

Так, увеличение высоты снежного покрова на 20 см вызывает изменение тяжести на 4,3 мкГал при расчетной плотности снега в  $500 \text{ кг/м}^3$ .

### 2.4.3 Вариации вычисления поправки за промежуточный слой (редукция Буге)

Данный подраздел в своей основе вдохновлен результатами исследований Бычкова С. Г. [8].

В случае, если необходимо вычислить поправку за притяжение сферического сегмента, а не плоскопараллельного слоя, используют точные формулы, предложенные Ремпелем Г. Г. (1980) и Каленицким А. И. и Смирновым В. П. (1981).

Формула Ремпеля Г. Г.

$$\Delta_2 g_{\text{Сф.сл}} = 2\pi G\delta \left[ \left( \frac{1}{3R^2} (R^3 - R_0^3 + dL - d_0 L_0) - R^2 \sin \alpha \cos \alpha \ln \frac{d+R-R \cos \alpha}{d_0+R_0-R \cos \alpha} \right) \right], \quad (2.13)$$

где  $\Delta_2 g_{\text{Сф.сл}_1}$  – поправка за влияние топографических масс при сферическом сегменте (вариация редукции Буге);

$$\alpha = \frac{S}{R_0} - \text{угол сферического сегмента};$$

$$R = R_0 + H ;$$

$$d = R\sqrt{2(1 - \cos \alpha)} ;$$

$$d_0 = \sqrt{R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos \alpha} ;$$

$$L = R^2(\cos \alpha + 3 \cos^2 \alpha - 1);$$

$$L_0 = R_0^2 + RR_0 \cos \alpha + 3R^2 \cos^2 \alpha - 2R^2.$$

При радиусе сферического сегмента  $S < 2500$  и толщине слоя  $H < 2000$  м формула (2.13) Каленицкого А. И. и Смирнова В. П. дает погрешность относительно формулы Ремпеля Г. Г. не более 5 мкГал

$$\Delta_2 g_{\text{Сф.сл.}_2} = 2\pi G \delta \left( S + H - \sqrt{S^2 + H^2} \right) \left( 1 + \sin \frac{S}{2R_0} \right) - 0.00012H. \quad (2.14)$$

Отличной визуализацией различия точных формул (Ремпеля Г. Г.) (2.13) и (2.14) при плотности  $\delta = 2.67 \text{ г/см}^3$  при различных радиусах сферического сегмента ( $S$ ) и высоты пункта наблюдения является рисунок 2.6.



Рисунок 2.6 – Визуализация сферического и плоскопараллельного слоя

Из графика, приведенного на рисунке 2.7, видно, что расхождения представляют из себя нелинейный график (с увеличением радиуса сферического сегмента и высоты увеличивается расхождение в разностях поправки).

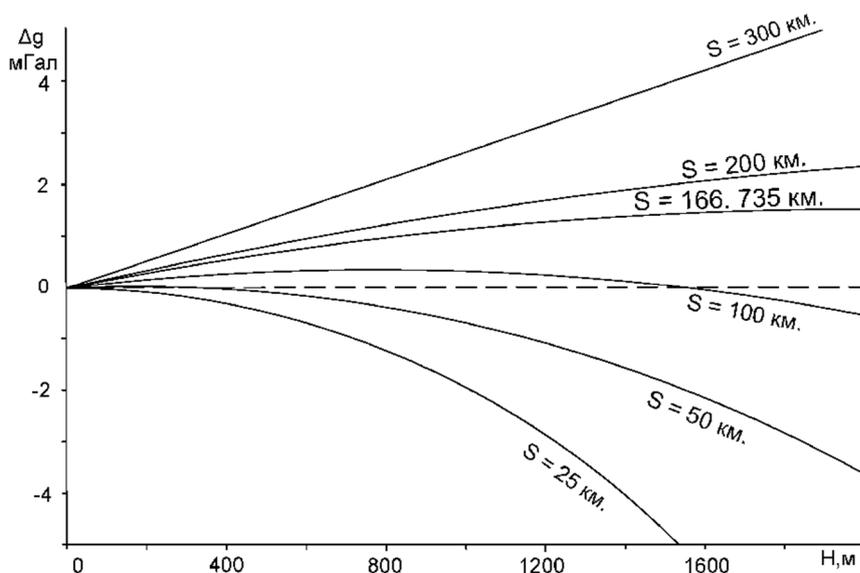


Рисунок 2.7 – График расхождений поправок за промежуточный слой и сферический сегмент (Редукция Буге) в зависимости от используемой формулы

#### 2.4.4 Способ учета ВСТ в результаты высокоточного нивелирования через поправку в превышения через УОЛ

Геометрически влияние уклонения отвеса на результаты высокоточного нивелирования представлено на рисунке 2.8.

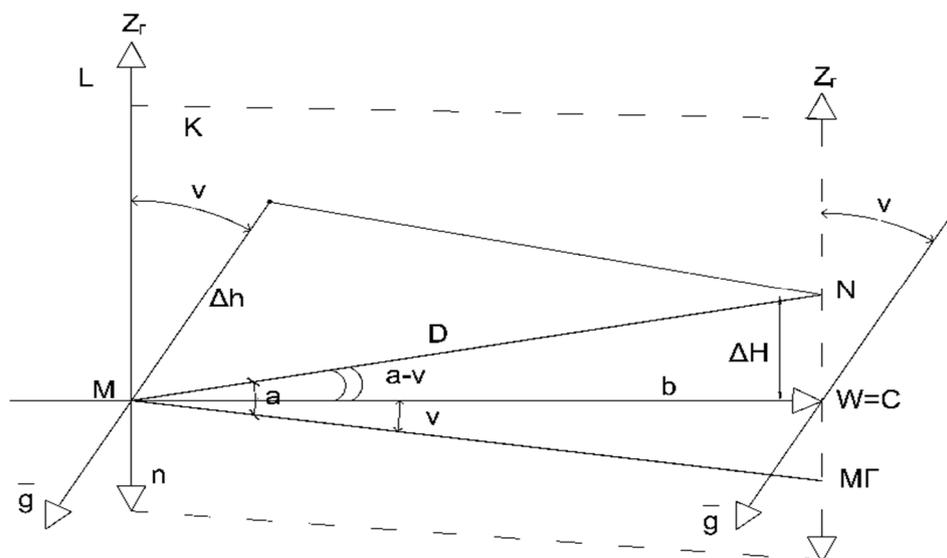


Рисунок 2.8 – Геометрическое представление влияния уклонения отвеса на результаты высокоточного нивелирования

На рисунке 2.8:

$D$  – измеренное наклонное расстояние между двумя рейками MN;

$MZ$  – направление нормали к уровенной поверхности (поверхности равного потенциала  $W = C$ );

$\Delta H$  – превышение между точками  $M$  и  $N$  (разность геодезических высот);

$g$  – вектор силы тяжести;

$v$  – уклонение отвесной линии;

$a$  – угол наклона линии АВ относительно горизонта;

$b$  – проекция измеренного расстояния на плоскость (горизонтальное проложение);

МГ – плоскость математического горизонта (т. е. плоскость, перпендикулярная отвесной линии);

$\Delta h$  – превышение между точками  $M$  и  $N$  (разность высот, полученная из геометрического нивелирования). Инструмент ориентируют по отвесной линии.

Исходя из рисунка 2.8, превышение между точками  $\Delta H$

$$\Delta H = D \cdot \sin(a - v) = b \cdot \tan(a - v), \quad (2.15)$$

или

$$\Delta H = D \cdot \sin a \cdot \cos v - D \cdot \cos a \cdot \sin v. \quad (2.16)$$

С учетом того, что уклонение отвесной линии редко превышает  $1''$ ,  $\cos v \approx 1$ ,  $\sin v \approx v$  (2.17)

$$\Delta H = D \cdot \sin a - D \cdot v \cdot \cos a. \quad (2.17)$$

Так как второе слагаемое представляет собой поправку в измеренное превышение ( $\Delta H$ ) за уклонение отвесной линии, учитывая, что  $D \cdot \sin a = \Delta h$ , а  $D \cdot \cos a = b$ .

$$\Delta H = \Delta h - v \cdot b. \quad (2.18)$$

#### 2.4.5 Способ учета ВСТ в результаты высокоточного нивелирования через ввод поправок в превышения за переход к разностям нормальных высот

Согласно инструкции [27], уравнивательные вычисления для нивелирования I и II класса необходимо выполнять после введения в измеренные превышения поправок за разность нормальных высот.

Основная формула разности нормальных высот реперов будет выглядеть так [36]

$$H_{qk} - H_{qi} = h_{ik} - f, \quad (2.19)$$

где  $H_{qk}$  и  $H_{qi}$  – нормальные высоты реперов  $k$  и  $l$ ;

$h_{ik}$  – измеренное превышение репера  $K$  над репером;

$f$  – поправка за переход к разности нормальных высот (в Инструкции по нивелированию 1, II, III и IV классов», изд. 1966 г. поправка  $f$  названа поправкой за непараллельность уровенных поверхностей)

Поправку  $f$  вычисляют по формуле

$$f = -\frac{1}{\gamma_m} \cdot (\gamma_{ok} - \gamma_{oi}) \cdot H_m + \frac{1}{\gamma_m} \cdot (g - \gamma)_m \cdot h_{ik}, \quad (2.20)$$

где  $\gamma_m$  – приближенное значение нормальной силы тяжести, принимаемое постоянным для всей территории страны и равным 980 000 миллигал;

$\gamma_{ok} - \gamma_{oi}$  – значения нормальных сил тяжести на отсчетном эллипсоиде в точках  $k$  и  $l$ ;

$H_m$  – средняя высота реперов  $l$  и  $k$ ;

$g$  – измеренная сила тяжести;

$\gamma$  – нормальная сила тяжести;

$(g - \gamma)_m$  – среднее арифметическое из аномалий сил тяжести в точках  $l$  и  $k$ .

Для вычисления значения  $(g - \gamma)_m$  необходимо определить величины  $g - \gamma$  на каждом репере. При этом возможны три случая:

1) имеются данные измерения сил тяжести  $g$  на каждом пункте нивелирования;

2) значения сил тяжести  $g$  на пунктах нивелирования не измерялись, но на район нивелирования имеются гравиметрические карты, составленные в редукции Буге (как правило, на равнинные и всхолмленные районы);

3) на район нивелирования имеются только гравиметрические карты, составленные в неполной топографической редукции (как правило, на горные и высокогорные районы). Подробное описание данного метода представлено в [27].

## 2.5 Выводы по разделу 2

Во втором разделе рассмотрены основные теоретические аспекты гравитационного поля, систем высот и деформаций. Обосновано применение той или иной системы высот, проблематика их применения в различных задачах.

Продемонстрированы причины вариаций силы из-за приливных эффектов, землетрясений, изменений атмосферных нагрузок и уровня грунтовых вод. Поправка за притяжение сферического сегмента будет зависеть как от плотности грунта, так и его водонасыщенности.

Рассмотрен способ учета ВСТ в результаты высокоточного нивелирования через поправку в превышения через учет уклонения отвесной линии, согласно нормативной документации.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ, НИВЕЛИРНЫХ, СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПУНКТАХ СЕТИ

#### 3.1 Гравиметрические наблюдения

##### 3.1.1 Абсолютные измерения силы тяжести

Гравиметрические измерения на пунктах полигона выполнялись:

- одним баллистическим гравиметром ГБЛ-М № 001;
- двумя относительными гравиметрами CG-5.

Гравиметр ГБЛ-М предназначен для высокоточных измерений абсолютного значения силы тяжести в лабораторных и полевых условиях.

Каждый гравиметр ГБЛ является уникальным, но можно выделить близкие для всех технические характеристики (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Технические характеристики ГБЛ-М

Наименование характеристики	Значение
Инструментальная погрешность измерения ускорения силы тяжести, мкГал	$\leq 5$
Относительная погрешность стандарта частоты	$\leq 2 \cdot 10^{-10}$
Нестабильность длины волны излучения оптического стандарта	$\leq 5 \cdot 10^{-10}$
Давление остаточного газа в баллистической камере, мм рт. ст.	$\leq 5 \cdot 10^{-7}$
Длина волны оптического стандарта, нм	532,24557601
Продолжительность цикла единичного измерения, с	$\leq 8,5$
Число отсчётов за одно падение пробной массы	$\geq 5000$
Погрешность выставления луча лазера в вертикаль, ..."	$\leq 7$
Период собственных колебаний маятника сейсмофильтра, с	6 - 8
Потребляемая мощность, Вт	$\leq 250$
Источник электропитания, В	220 AC/12 DC
Габариты, см и масса, кг (без системы предварительной откачки)	42 × 47 × 94, 55 кг

Схема расположения гравиметрических пунктов представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема расположения гравиметрических пунктов в районе УС рядом с крупной рекой

Гравиметр CG-5 относится к классу статических гравиметров, предназначен для измерения приращения силы тяжести между пунктами.

Технические характеристики CG-5 представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики CG-5

Характеристика	Значение
Чувствительная система	Плавленный кварц с электростатической компенсацией
Дискретность отсчёта, мкГал	1
Погрешность, мкГал	$\leq 5$
Рабочий диапазон, мГал	8 000 без переустановки
Остаточный долгопериодический дрейф (статический), мГал в сутки	$< 0,02$
Диапазон автоматического учёта наклона, "	$\pm 200$
Автоматическая коррекция	Прилив, наклон прибора, температура, стандартные шумы, сейсмические шумы
Рабочая температура, °С	От – 40 до + 45
Температурный коэффициент, мкГал/°С	0,2 (обычно)
Коэффициент атмосферного давления, мкГал/кПа	0,15 (обычно)
Коэффициент магнитного поля, мкГал/Гаусс	1 (обычно)
Точность определения координат с помощью строенной GPS-аппаратуры и внешней 12-канальной антенны, м	15
Память	Флеш-карта (с защитой данных)
Цифровой вывод данных	Последовательный интерфейс RS-232C и USB (адаптировано под WinXP)
Дисплей	$\frac{1}{4}$ VGA 320×240
Клавишная панель	27 буквенно-цифровых клавиш
Ёмкость аккумуляторных батарей, А·ч	2×6,6 аккумуляторные литий-ионные батареи 11 В с индикатором заряда
Продолжительность непрерывной работы в нормальных условиях	Полный день (с двумя полностью заряженными батареями)
Вес (включая батареи), кг	8

Следует отметить важный факт, что мы не берем в расчет влияния лунно-солнечных вариаций силы тяжести, поскольку в современных гравиметрах существует функция учета лунно-солнечных вариаций.

В результате шести циклов наблюдений на гравиметрических пунктах были получены результаты измерений силы тяжести гравиметром ГБЛ-М, предназначенного для высокоточных измерений абсолютного значения силы тяжести в лабораторных и полевых условиях.

Измерения были выполнены в октябре 2019 г., ноябре 2019 г., марте 2020 г., сентябре 2020 г., апреле 2021 г. и сентябре 2021 г. (таблицы 3.3–3.8).

Таблица 3.3 – Результаты измерений ускорения силы тяжести на главных пунктах 5, 6 и 7 (октябрь 2019 г.)

№ приёма	Дата замера	Азимут	$n$ , сер,	$g_k$ , мкГал	$\sigma_k$ , мкГал	$\bar{g}$ , мкГал	$\sigma_{\bar{g}}$ , мкГал
1	2	3	4	5	6	7	8
1*	2019-09-30	0°	7	*****6318,1	8,3	*****6326,2	6,4
		180°	7	*****6334,3	9,6		
2	2019-09-30	0°	9	*****6369,0	7,8	*****6345,7	4,7
		180°	7	*****6322,5	5,4		
3	2019-10-01	0°	7	*****6370,2	4,0	*****6352,7	3,2
		180°	7	*****6335,1	5,0		
4	2019-10-01	0°	7	*****6374,0	7,3	*****6351,6	5,5
		180°	7	*****6329,3	8,2		
1	2019-09-28	0°	8	*****3446,0	11,4	*****3441,6	10,4
		180°	7	*****3437,2	17,3		
2	2019-09-28	0°	7	****73486,7	4,4	****73451,2	5,6
		180°	7	****73415,7	10,3		
3	2019-09-27	0°	7	****73456,8	8,7	****73438,3	10,4
		180°	8	****73419,8	18,9		
1	2019-10-02	0°	8	****72004,5	5,1	****71967,1	4,9
		180°	7	****71929,8	8,3		
2	2019-10-02	0°	7	****71990,8	5,2	****71966,4	3,5
		180°	7	****71942,0	4,8		
3	2019-10-03	0°	7	****71998,8	3,8	****71965,3	6,1
		180°	7	****71931,9	11,6		

Таблица 3.4 – Результаты измерений ускорения силы тяжести на главных пунктах 5, 6 и 7 (ноябрь 2019 г.)

№ приёма	Дата замера	Азимут	$n$ , сер	$g_k$ , мкГал	$\sigma_k$ , мкГал	$\bar{g}$ , мкГал	$\sigma_{\bar{g}}$ , мкГал
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2019-11-13	0°	7	****76371,4	5,7	****76359,0	5,0
		180°	7	****76346,6	8,3		
2	2019-11-13	0°	7	****76390,5	7,5	****76366,2	6,1
		180°	7	****76342,0	9,6		
3	2019-11-14	0°	7	****76389,0	5,7	****76371,8	4,9
		180°	7	****76354,7	8,0		
1	2019-11-10	0°	9	****73429,1	12,5	****73444,7	7,3
		180°	7	****73460,4	7,7		
2	2019-11-10	0°	7	****73435,6	9,2	****73444,8	5,5
		180°	7	****73454,1	6,1		
3	2019-11-11	0°	9	****73466,7	10,2	****73446,7	7,5
		180°	9	****73426,8	11,0		
1	2019-11-07	0°	7	****72014,9	5,9	****71971,7	4,8
		180°	7	****71928,5	7,6		
2	2019-11-07	0°	7	****71989,5	7,1	****71964,0	6,3
		180°	7	****71938,6	10,4		
3	2019-11-08	0°	7	****71991,3	12,7	****71973,9	8,0
		180°	7	****71956,4	9,9		

Таблица 3.5 – Результаты измерений ускорения силы тяжести на главных пунктах 5, 6 и 7 (март 2020 г.)

№ приёма	Дата замера	Азимут	$n$ , сер	$g_k$ , мкГал	$\sigma_k$ , мкГал	$\bar{g}$ , мкГал	$\sigma_{\bar{g}}$ , мкГал
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2020-03-16	0°	5	****76406,9	13,4	****76362,5	7,9
		180°	5	****76318,1	8,5		
2	2020-03-16	0°	5	****76372,0	6,9	****76360,9	4,1
		180°	5	****76349,7	4,6		
3	2020-03-17	0°	7	****76361,5	9,2	****76355,1	9,9
		180°	6	****76348,6	17,6		
1	2020-03-13	0°	9	****73437,6	8,7	****73430,3	6,2
		180°	7	****73423,0	8,8		
2	2020-03-14	0°	7	****73405,4	14,1	****73421,5	11,3
		180°	7	****73437,6	17,6		
3	2020-03-14	0°	9	****73435,4	16,5	****73427,6	10,5
		180°	9	****73419,8	12,9		
1	2020-03-11	0°	7	****71966,5	15	****71958,5	10,3
		180°	7	****71950,4	14,2		
2	2020-03-11	0°	7	****72010,3	19,4	****71965,6	14,9
		180°	7	****71920,8	22,5		
3	2020-03-12	0°	7	****71987,1	19,2	****71972,6	14,1
		180°	7	****71958,1	20,7		

Таблица 3.6 – Результаты измерений ускорения силы тяжести на главных пунктах 5, 6 и 7 (сентябрь 2020 г.)

№ приёма	Дата замера	Азимут	n, сер,	$g_k$ , мкГал	$\sigma_k$ , мкГал	$\bar{g}$ , мкГал	$\sigma_{\bar{g}}$ , мкГал
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2020-09-04	0°	8	****76423,7	9,1	****76397,5	7,9
		180°	8	****76371,2	12,9		
2	2020-09-04	0°	8	****76412,3	2,5	****76387,6	3,8
		180°	8	****76362,8	7,2		
3	2020-09-05	0°	8	****76414,8	5,7	****76388,1	4,9
		180°	8	****76361,3	7,9		
1	2020-09-02	0°	9	****73453,4	6,0	****73443,3	5,5
		180°	9	****73433,2	9,1		
2	2020-09-03	0°	9	****73449,2	15,4	****73439,4	8,4
		180°	9	****73429,6	6,7		
3	2020-09-03	0°	9	****73465,3	20,0	****73447,0	12,9
		180°	9	****73428,7	16,2		
1	2020-08-31	0°	7	****71991,2	6,5	****71966,8	3,9
		180°	7	****71942,3	4,2		
2	2020-08-31	0°	7	****71982,8	13,2	****71960,0	7,6
		180°	7	****71937,2	7,6		
3	2020-09-01	0°	7	****72006	8,8	****71971,3	5,6
		180°	7	****71936,6	6,8		

Таблица 3.7 – Результаты измерений ускорения силы тяжести на главных пунктах 5, 6 и 7 (апрель 2021 г.)

№ приёма	Дата замера	Азимут	n, сер,	$g_k$ , мкГал	$\sigma_k$ , мкГал	$\bar{g}$ , мкГал	$\sigma_{\bar{g}}$ , мкГал
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2021-04-16	0°	8	****76354,97	9,14	****76341,70	5,53
		180°	8	****76328,42	6,23		
2	2021-04-16	0°	8	****76358,04	6,01	****76344,07	4,96
		180°	8	****76330,10	7,90		
3	2021-04-17	0°	8	****76354,10	5,31	****76337,68	5,69
		180°	8	****76321,26	10,08		
1	2021-04-14	0°	8	****73438,20	9,77	****73437,98	9,98
		180°	8	****73437,75	17,40		
2	2021-04-14	0°	9	****73447,10	4,71	****73442,48	3,14
		180°	9	****73437,85	4,14		
3	2021-04-15	0°	11	****73439,04	13,28	****73435,40	8,7
		180°	11	****73431,75	11,24		
1	2021-04-09	0°	6	****71990,30	4,35	****71957,66	4,79
		180°	6	****71925,01	8,54		
2	2021-04-10	0°	7	****71976,28	7,04	****71957,01	8,16
		180°	7	****71937,74	14,73		
3	2021-04-10	0°	9	****72008,40	7,18	****71962,59	11,43
		180°	7	****71916,70	21,71		

Таблица 3.8 – Результаты измерений ускорения силы тяжести на главных пунктах 5, 6 и 7 (сентябрь 2021 г.)

№ приёма	Дата замера	Азимут	n, сер.	$g_k$ , мкГал	$\sigma_k$ , мкГал	$\bar{g}$ , мкГал	$\sigma_{\bar{g}}$ , мкГал
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2021-08-21	0°	8	****76393,20	8,62	****76374,61	6,80
		180°	8	****76356,01	10,52		
2	2021-08-21	0°	8	****76383,99	3,82	****76369,52	3,28
		180°	8	****76355,04	5,33		
3	2021-08-22	0°	8	****76379,67	4,23	****76369,30	5,30
		180°	8	****76358,93	9,72		
1	2021-08-25	0°	9	****73457,78	19,28	****73455,78	10,01
		180°	9	****73453,78	5,37		
2	2021-08-25	0°	9	****73463,33	5,53	****73455,88	3,93
		180°	9	****73448,42	5,59		
3	2021-08-26	0°	9	****73466,22	7,54	****73460,23	5,42
		180°	7	****73454,23	7,80		
1	2021-08-23	0°	8	****72000,69	11,34	****71968,76	6,27
		180°	8	****71936,83	5,37		
2	2021-08-23	0°	8	****72003,46	3,93	****71975,65	2,98
		180°	8	****71947,84	4,48		
3	2021-08-24	0°	8	****72005,64	5,23	****71977,86	4,94
		180°	8	****71950,07	8,39		

В результате сравнения среднеарифметических значений измеренных абсолютных значений силы тяжести по приемам можно выполнить межцикловое сравнение результатов в зависимости от уровня грунтовых вод в пьезометрических скважинах.

Межсезонные сравнения абсолютных значений силы тяжести с представлены в таблицах 3.9–3.13.

Таблица 3.9 – Сравнение результатов абсолютных измерений силы тяжести между I и II циклами измерений (ноябрь 2019 г. – март 2020 г.)

№ пункта	05	06	07
$\Delta g_k$ , мкГал	22	2	4

Примечание –  $\Delta g_k$  – это разность средних арифметических значений до введения поправки за вертикальный градиент (редукции в свободном воздухе)

Таблица 3.10 – Сравнение результатов абсолютных измерений силы тяжести между II и III циклами измерений (ноябрь 2019 г. – март 2020 г.)

№ пункта	05	06	07
$\Delta g_k$ , мкГал	-6	-19	-4
Примечание – $\Delta g_k$ – это разность средних арифметических значений до введения поправки за вертикальный градиент (редукции в свободном воздухе)			

Таблица 3.11 – Сравнение результатов абсолютных измерений силы тяжести между III и IV циклами измерений (март 2020 г. – сентябрь 2020 г.)

№ пункта	05	06	07
$\Delta g_k$ , мкГал	32	17	0.5
Примечание – $\Delta g_k$ – это разность средних арифметических значений до введения поправки за вертикальный градиент (редукции в свободном воздухе)			

Таблица 3.12 – Сравнение результатов абсолютных измерений силы тяжести между IV и V циклами измерений (сентябрь 2020 г. – апрель 2021 г.)

№ пункта	05	06	07
$\Delta g_k$ , мкГал	-50	-5	-7
Примечание – $\Delta g_k$ – это разность средних арифметических значений до введения поправки за вертикальный градиент (редукции в свободном воздухе)			

Таблица 3.13 – Сравнение результатов абсолютных измерений силы тяжести между V и VI циклами измерений (апрель 2021 г. – сентябрь 2021 г.)

№ пункта	05	06	07
$\Delta g_k$ , мкГал	30	19	15
Примечание – $\Delta g_k$ – это разность средних арифметических значений до введения поправки за вертикальный градиент (редукции в свободном воздухе)			

Как видно из рисунка 3.2 и таблиц 3.9 И 3.13, ВСТ наблюдается в разные периоды времени. Можно сделать вывод, что совокупность неприливных воздействий на площадке строительства УС приводит к колебаниям силы тяжести.

Результаты сравнения абсолютных значений силы тяжести на главных гравиметрических пунктах представлены на рисунке 3.2.

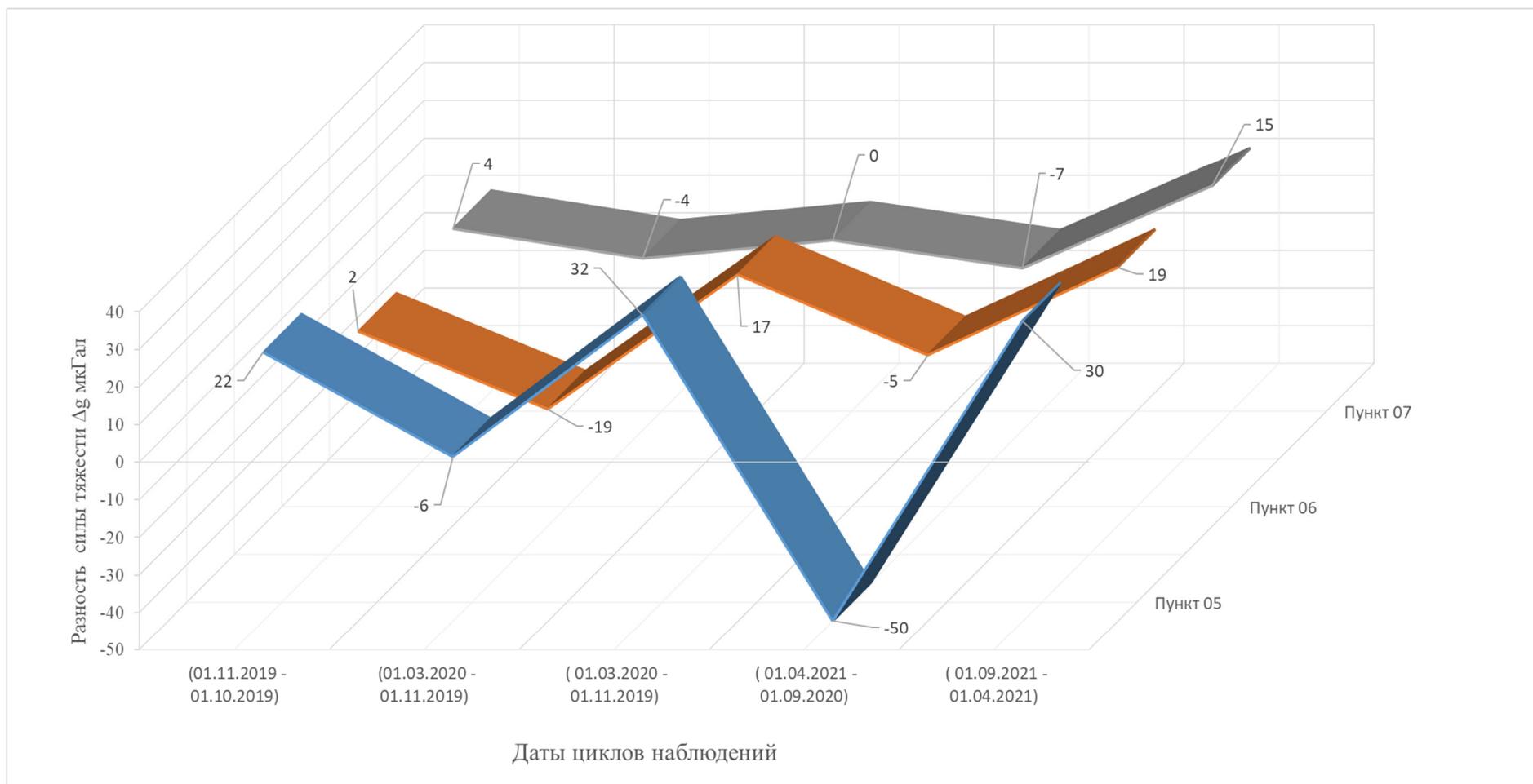


Рисунок 3.2 – Результаты сравнения абсолютных значений силы тяжести на главных гравиметрических пунктах в разные циклы наблюдений

### 3.1.2 Относительные измерения силы тяжести

При обработке относительных гравиметрических измерений учтены следующие поправки:

- коэффициент шкалы (цена деления) прибора;
- лунно-солнечные вариации;
- смещение нуля-пункта;
- высота прибора.

ВСТ, связанные с влиянием Луны и Солнца, вводятся гравиметром CG-5 автоматически в процессе производства измерений. Результаты относительных измерений представлены в таблице 3.14.

Главным пунктом является PG05. Для контроля выполненных абсолютных наблюдений было измерено приращение силы тяжести между этими пунктами при помощи двух относительных гравиметров CG-5. СКП определения ускорения силы тяжести относительным и абсолютным методом представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.14 – Абсолютные значения силы тяжести для пунктов гравиметрической сети, полученные по относительным гравиметрическим наблюдениям на площадке УС

№	Пункты гравиметрической сети													
	01		02		03		04		05		06		07	
	g, мГал	$\sigma$ , мГал	g, мГал	$\sigma$ , мГал	g, мГал	$\sigma$ , мГал	g, мГал	$\sigma$ , мГал	g, мГал	$\sigma$ , мГал	g, мГал	$\sigma$ , мГал	g, мГал	$\sigma$ , мГал
1	****75,6	0,005	****73,9	0,006	****74,4	0,006	****74,7	0,006	****76,6	<b>0,005</b>	****73,7	0,006	****72,2	0,005
2	****75,7	0,007	****73,9	0,007	****74,4	0,008	****74,7	0,007	****76,6	<b>0,007</b>	****73,7	0,005	****72,2	0,005
3	****75,7	0,006	****73,8	0,005	****74,4	0,005	****74,7	0,006	****76,6	<b>0,005</b>	****73,7	0,006	****72,2	0,007
4	****75,7	0,006	****73,9	0,006	****74,4	0,006	****74,7	0,006	****76,6	<b>0,005</b>	****73,7	0,005	****72,2	0,005
5	****75,6	0,007	****73,8	0,006	****74,4	0,006	****74,7	0,005	****76,6	<b>0,005</b>	****73,7	0,005	****72,2	0,005
6	****75,7	0,005	****73,9	0,005	****74,4	0,007	****74,7	0,006	****76,6	<b>0,005</b>	****73,7	0,005	****72,2	0,005
	08		09		10		11		12		13		14	
1	****73,2	0,006	****75,1	0,005	****75,8	0,005	****75,5	0,005	****72,9	0,007	****72,4	0,005	****73,2	0,006
2	****73,2	0,007	****75,1	0,007	****75,8	0,007	****75,5	0,007	****72,9	0,007	****72,3	0,007	****73,1	0,008
3	****73,2	0,007	****75,1	0,007	****75,8	0,005	****75,4	0,005	****72,9	0,005	****72,3	0,006	****73,1	0,006
4	****73,2	0,006	****75,1	0,006	****75,9	0,006	****75,5	0,006	****72,9	0,007	****72,4	0,007	****73,2	0,007
5	****73,2	0,006	****75,1	0,006	****75,8	0,005	****75,4	0,006	****72,9	0,006	****72,3	0,007	****73,1	0,007
6	****73,2	0,007	****75,1	0,005	****75,8	0,005	****75,5	0,005	****72,9	0,007	****72,4	0,007	****73,2	0,006
	15		16		17		18		19		20		21	
1	****74,1	0,006	****75,2	0,005	****75,4	0,006	****73,2	0,006	****75	0,005	****73,9	0,007	****72,4	0,007
2	****74,1	0,007	****75,2	0,007	****75,4	0,007	****73,2	0,007	****75	0,007	****73,9	0,008	****72,4	0,008
3	****74,0	0,005	****75,2	0,005	****75,5	0,006	****73,3	0,006	****75,1	0,005	****73,9	0,006	****72,4	0,006
4	****74,1	0,006	****75,3	0,007	****75,5	0,007	****73,3	0,007	****75,1	0,007	****73,9	0,006	****72,5	0,006
5	****74,0	0,006	****75,2	0,006	****75,4	0,005	****73,2	0,006	****75,0	0,006	****73,9	0,006	****72,4	0,006
6	****74,1	0,007	****75,2	0,005	****75,4	0,005	****73,2	0,006	****75,0	0,005	****73,9	0,005	****72,4	0,007

№	Пункты гравиметрической сети													
	22		23		24		25		26		27		28	
1	****74,8	0,006	****74,9	0,007	****73,9	0,005	****72,5	0,006	****71,6	0,006	****71,8	0,005	****73,6	0,005
2	****74,8	0,007	****74,9	0,007	****74	0,008	****72,5	0,008	****71,6	0,008	****71,8	0,008	****73,6	0,008
3	****74,9	0,005	****74,9	0,005	****74	0,005	****72,5	0,006	****71,6	0,007	****71,8	0,007	****73,5	0,007
4	****74,9	0,007	****74,9	0,006	****74	0,007	****72,5	0,007	****71,6	0,007	****71,9	0,007	****73,6	0,006
5	****74,9	0,006	****74,9	0,006	****74	0,005	****72,5	0,006	****71,6	0,006	****71,8	0,007	****73,5	0,005
6	****74,8	0,005	****74,9	0,005	****73,9	0,006	****72,5	0,006	****71,6	0,007	****71,9	0,007	****73,6	0,006
	29		30		31		32		33		34			
1	****71,1	0,006	****71	0,007	****69,6	0,007	****69,1	0,006	****62,3	0,006	****73,5	0,005		
2	****71,1	0,008	****71	0,007	****69,6	0,007	****69,1	0,007	****62,3	0,008	****73,5	0,008		
3	****71,1	0,007	****71	0,006	****69,6	0,006	****69,2	0,007	****62,3	0,007	****73,6	0,006		
4	****71,1	0,006	****71	0,007	****69,6	0,007	****69,1	0,006	****62,3	0,006	****73,5	0,006		
5	****71,1	0,007	****71	0,007	****69,6	0,007	****69,1	0,005	****62,3	0,007	****73,5	0,007		
6	****71,1	0,006	****71	0,007	****69,6	0,005	****69,1	0,006	****62,3	0,006	****73,5	0,006		
Примечания														
1 Полу жирным шрифтом выделен опорный пункт, относительно которого определена сила тяжести каждого цикла.														
2 Период проведения гравиметрических циклов:														
1 – октябрь 2019 г.														
2 – ноябрь 2019 г.														
3 – март 2020 г.														
4 – сентябрь 2020 г.														
5 – апрель 2021 г.														
6 – сентябрь 2021 г.														

Таблица 3.15 – СКП определения ускорения силы тяжести относительно PG05, мкГал

Цикл и период наблюдений	PG06	PG07	PG02	PG10	PG11
1, 2019 г., октябрь	1,6	2,5	2,1	1,5	1,2
2, 2019 г., ноябрь	2,8	2,5	2,9	0,9	2,6
3, 2020 г., март	2,4	2,9	1,8	1,0	2,1
4, 2020 г., сентябрь	2,3	1,3	2,5	2,1	2,3
5, 2021 г., апрель	2,3	3,0	2,9	1,3	2,9

### 3.1.3 Анализ результатов относительных гравиметрических измерений

Межцикловое изменение ускорения силы тяжести на гравиметрических пунктах в районе размещения УС приведено в таблице 3.16. Сравнение результатов относительных измерений силы тяжести представлено на рисунках 3.4–3.6.

Таблица 3.16 – Межцикловое изменение ускорения силы тяжести по относительным измерениям с октября 2019 г. по сентябрь 2021 г.

Номер пункта	g <sub>1-2</sub> , мкГал	g <sub>2-3</sub> , мкГал	g <sub>3-4</sub> , мкГал	g <sub>4-5</sub> , мкГал	g <sub>5-6</sub> , мкГал
01	18	3	21	-40	19
02	-6	-45	90	-121	92
03	7	13	2	-14	-6
04	4	10	8	-20	-2
05	15	-2	26	-44	26
06	-1	-17	13	3	13
07	2	-6	3	-5	14
08	13	13	-4	-16	-8
09	-33	-12	47	-38	16
10	12	-7	21	-48	33
11	5	-27	53	-87	61
12	22	9	10	-19	-17
13	-16	-17	65	-81	61
14	-20	-5	61	-70	45
15	-2	-27	64	-88	66
16	6	-11	41	-47	18
17	16	2	19	-34	7
18	15	7	12	-23	1
19	18	5	14	-31	3
20	8	-1	37	-47	15
21	21	8	32	-40	-4
22	15	15	-3	-9	-17
23	19	-2	24	-46	16

Номер пункта	g <sub>1-2</sub> , мкГал	g <sub>2-3</sub> , мкГал	g <sub>3-4</sub> , мкГал	g <sub>4-5</sub> , мкГал	g <sub>5-6</sub> , мкГал
24	18	13	-4	-7	-14
25	14	10	2	-15	-2
26	14	5	6	-21	1
27	-14	-34	69	-101	90
28	2	-39	63	-98	75
29	16	12	-10	4	-19
30	18	6	6	-5	-8
31	21	3	15	-10	-2
32	12	12	-11	-3	-2
33	0	22	-8	16	-55
34	7	13	-9	2	-31

В качестве критерия значимости изменения силы тяжести была выбрана величина 35 мкГал. Пункты, удовлетворяющие данному критерию, представлены на рисунке 3.3.

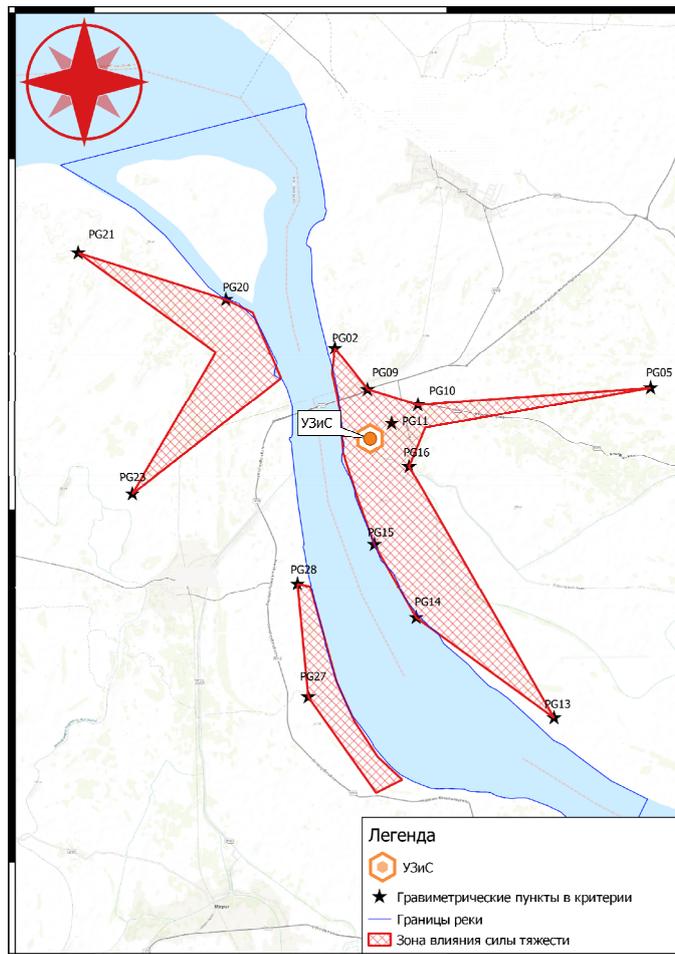


Рисунок 3.3 – Зона влияния силы тяжести на площадке строительства УС



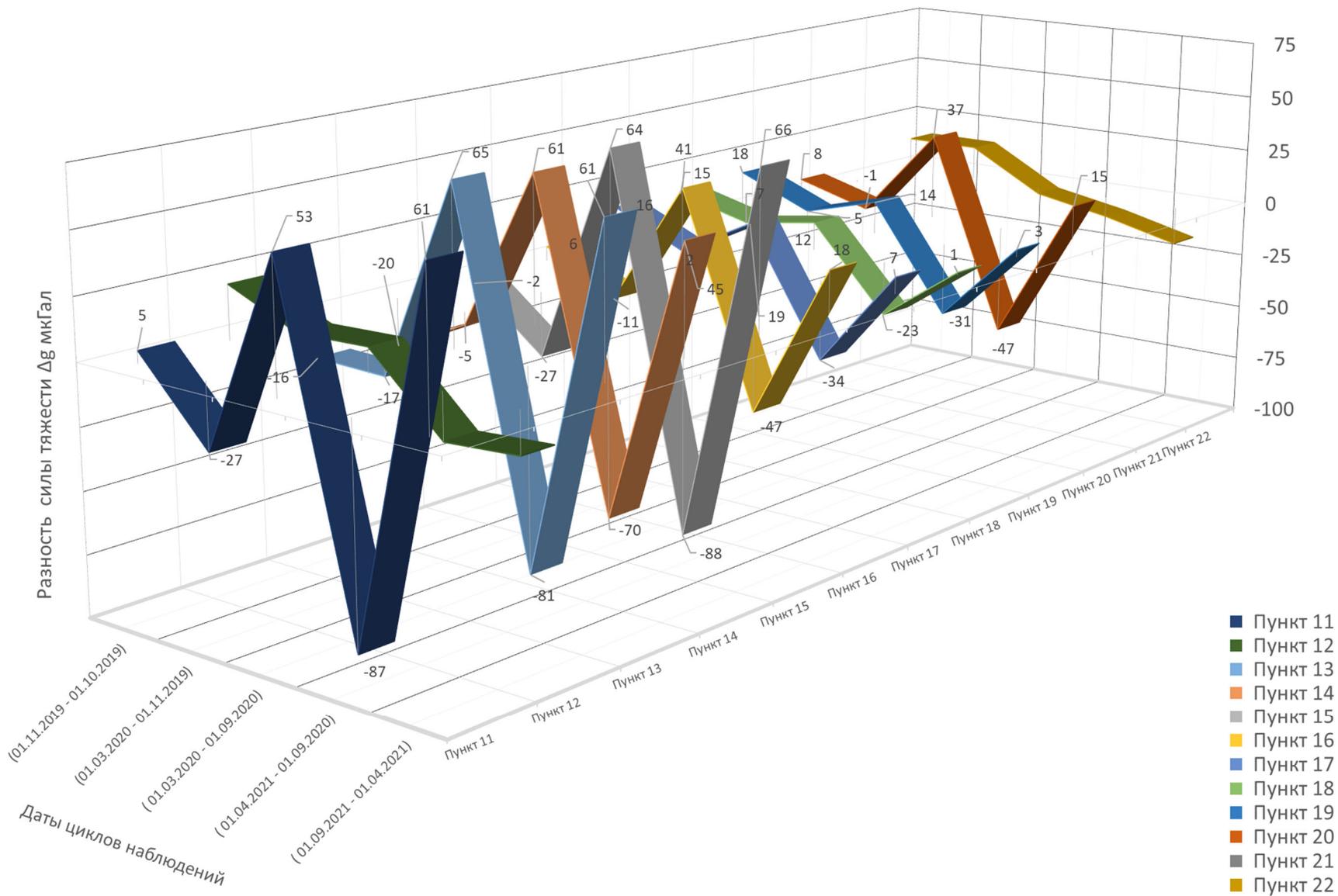


Рисунок 3.5 – Межцикловое изменение ускорения силы тяжести с октября 2019 г. по сентябрь 2021 г. (пункты 11–22)

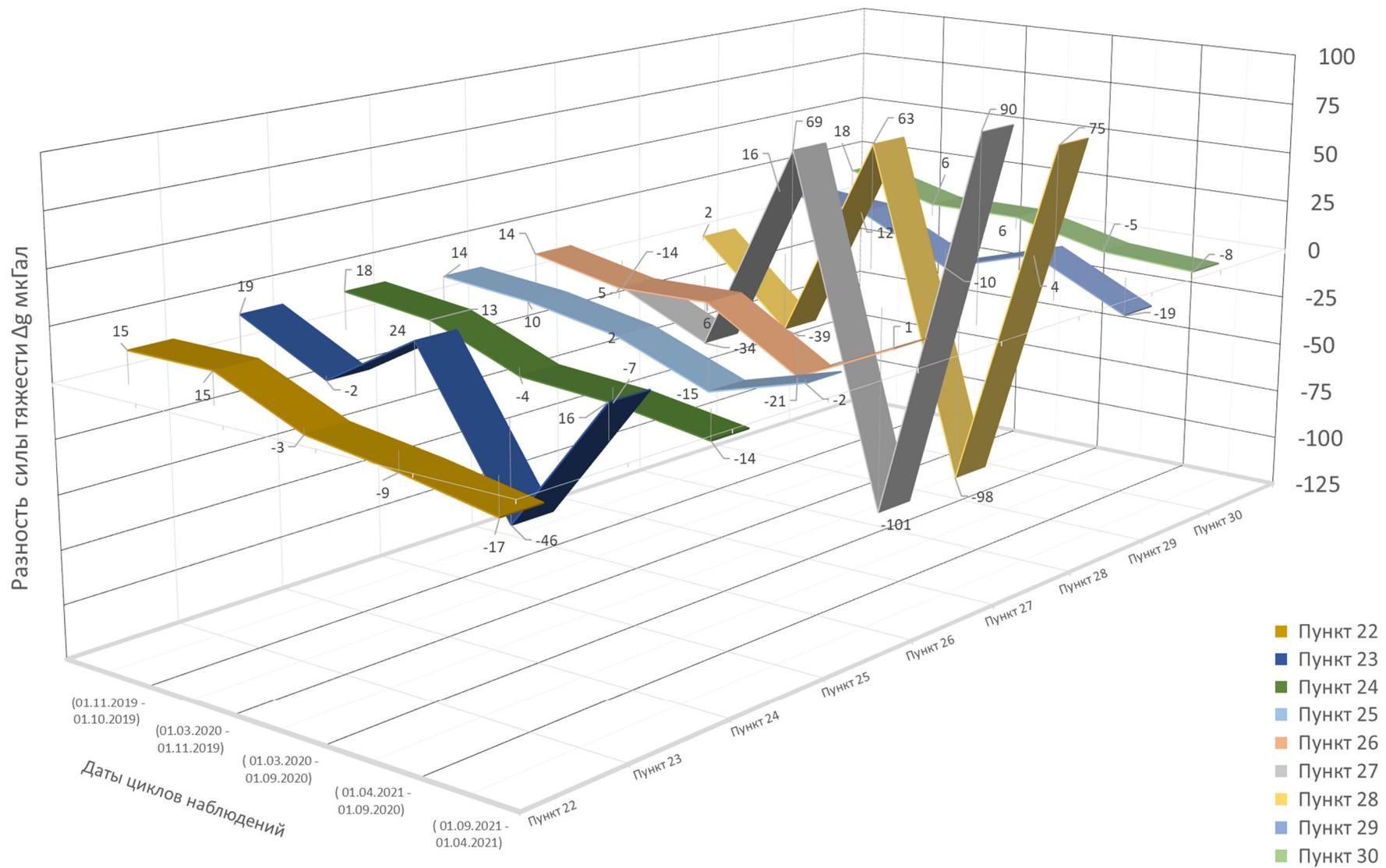


Рисунок 3.6 – Межцикловое изменение ускорения силы тяжести с октября 2019 г. по сентябрь 2021 г. (пункты 22–30)

Сопоставление разностей силы тяжести, выполненных при одинаковом уровне грунтовых вод при минимуме и максимуме, демонстрирует почти равнозначные результаты, СКП составляет 18 и 24 МкГал соответственно (таблица 3.17). Это говорит о корректности выбранного критерия как 35 МкГал (при доверительной вероятности 95 % удвоенная погрешность разности меньшей СКП силы тяжести составляет как раз 35 МкГал).

Таблица 3.17 – ВСТ при двух экстремумах (минимуме и максимуме) уровня грунтовых вод

№ пункта	ВСТ при минимальном уровне грунтовых вод (период 1 год), мкГал	ВСТ при максимальном уровне грунтовых вод (период 1 год), мкГал
Пункт 1	-19	-21
Пункт 2	-31	-29
Пункт 3	-12	-20
Пункт 4	-12	-22
Пункт 5	-18	-18
Пункт 6	16	16
Пункт 7	-2	9
Пункт 8	-20	-24
Пункт 9	9	-22
Пункт 10	-27	-15
Пункт 11	-34	-26
Пункт 12	-9	-36
Пункт 13	-16	-20
Пункт 14	-9	-25
Пункт 15	-24	-22
Пункт 16	-6	-29
Пункт 17	-15	-27
Пункт 18	-11	-22
Пункт 19	-17	-28
Пункт 20	-10	-32
Пункт 21	-8	-44
Пункт 22	-12	-26
Пункт 23	-22	-30
Пункт 24	-11	-21
Пункт 25	-13	-17
Пункт 26	-15	-20
Пункт 27	-32	-11
Пункт 28	-35	-15
Пункт 29	-6	-13
Пункт 30	1	-12
Пункт 31	5	-2
Пункт 32	-14	-5
Пункт 33	8	-39
Пункт 34	-7	-29
<b>СКП</b>	<b>18</b>	<b>24</b>

### 3.2 Геометрическое нивелирование

Высокоточное нивелирование по исходным пунктам высотной геодезической сети осуществляется по методике геометрического нивелирования 1-го разряда в прямом и обратном направлениях, с использованием двух пар инварных реек и костылей по «мягкому» грунту (песок, почва и т. д.) и одной пары реек и геодезических башмаков (массивных металлических подставок) по твердому покрытию (асфальт, бетон, укатанный грунт и пр.). Рекомендуемый, но не обязательный порядок наблюдений на станции следующий:

- на нечётной станции – отсчёт на заднюю рейку – отсчёт на переднюю рейку – сбивка горизонта – отсчёт на переднюю рейку – отсчёт на заднюю рейку (ЗППЗ);
- на чётной станции – отсчёт на переднюю рейку – отсчёт на заднюю рейку – сбивка горизонта – отсчёт на заднюю рейку – отсчёт на переднюю рейку.

Средние квадратические погрешности на станции не должны превышать допустимое значение 0,08 мм (для 1-го разряда) и 0,13 мм (для 2-го разряда), согласно [52].

Измерение превышений выполнялось цифровыми нивелирами Trimble DiNi 0.3 с использованием инварных штрих-кодовых реек LD 12, прошедших метрологические поверки до начала полевых работ.

Результаты выполненных наблюдений, анализ и сравнение результатов представлены в 4.4.

### 3.3 Спутниковые наблюдения

Обработка относительных фазовых наблюдений в сети проводилась в статическом режиме в программе Magnet Tools.

Программа Magnet Tools поддерживает следующие типы разрешения фазовых неоднозначностей:

- фиксированное (Fixed), при котором все значения являются целыми числами;
- частично фиксированное (Partial), если не все вычисленные значения являются целыми числами;

– плавающее (Float), когда все значения являются вещественными числами.

Точное определение координат абсолютным методом (в зарубежных источниках имеет обозначение PPP – Precise Point Positioning).

Технология обрабатывает наблюдения лишь одного приёмника при условии использования точных эфемерид спутников, параметров бортовых часов и параметров ионосферы, которые необходимы для минимизации ошибок глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Каждая эпоха наблюдений обрабатывается независимо, существует возможность проведения статистического анализа получаемых данных и оценки точности по внутренней сходимости наблюдений.

### 3.4 Выводы по разделу 3

В рамках исследования получены следующие результаты:

– проанализированы результаты относительных и абсолютных гравиметрических наблюдений, показано схематическое расположение пунктов ГДП и динамика ВСТ;

– разработан и обоснован критерий влияния силы тяжести;

– продемонстрированы методы полевых спутниковых и нивелирных наблюдений на площадке исследований.

#### 4 МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Как отмечалось ранее, традиционные методики учета ВСТ в результаты геодезических принято разделять на два метода:

1) вычисление поправки в измеренное превышение через разность нормальных высот [27];

2) вычисление УОЛ с применением палетки Еремеева и ввод поправок в измеренное превышение (2.4.4).

Оба метода применимы при двух условиях:

- выполнение гравиметрической съемки на каждом пункте нивелирования;
- построение гравиметрической карты и интерполирование данных в промежуточных точках.

Выполнение первого условия на локальном участке строительства УС почти невозможно, в связи с дороговизной и трудоемкостью при проведении самих работ и по причине постоянных вибраций на крупной строительной площадке и проездов крупногабаритного грузенного транспорта.

Второе условие порождает ошибки интерполирования, что с учетом серьезных перепадов между котлованами и изменением уровня грунтовых вод приведет к вычислению приближенной поправки в измеренные превышения, что недопустимо для высокоточного нивелирования.

Общая блок-схема разработанной методики представлена на рисунке 4.1.

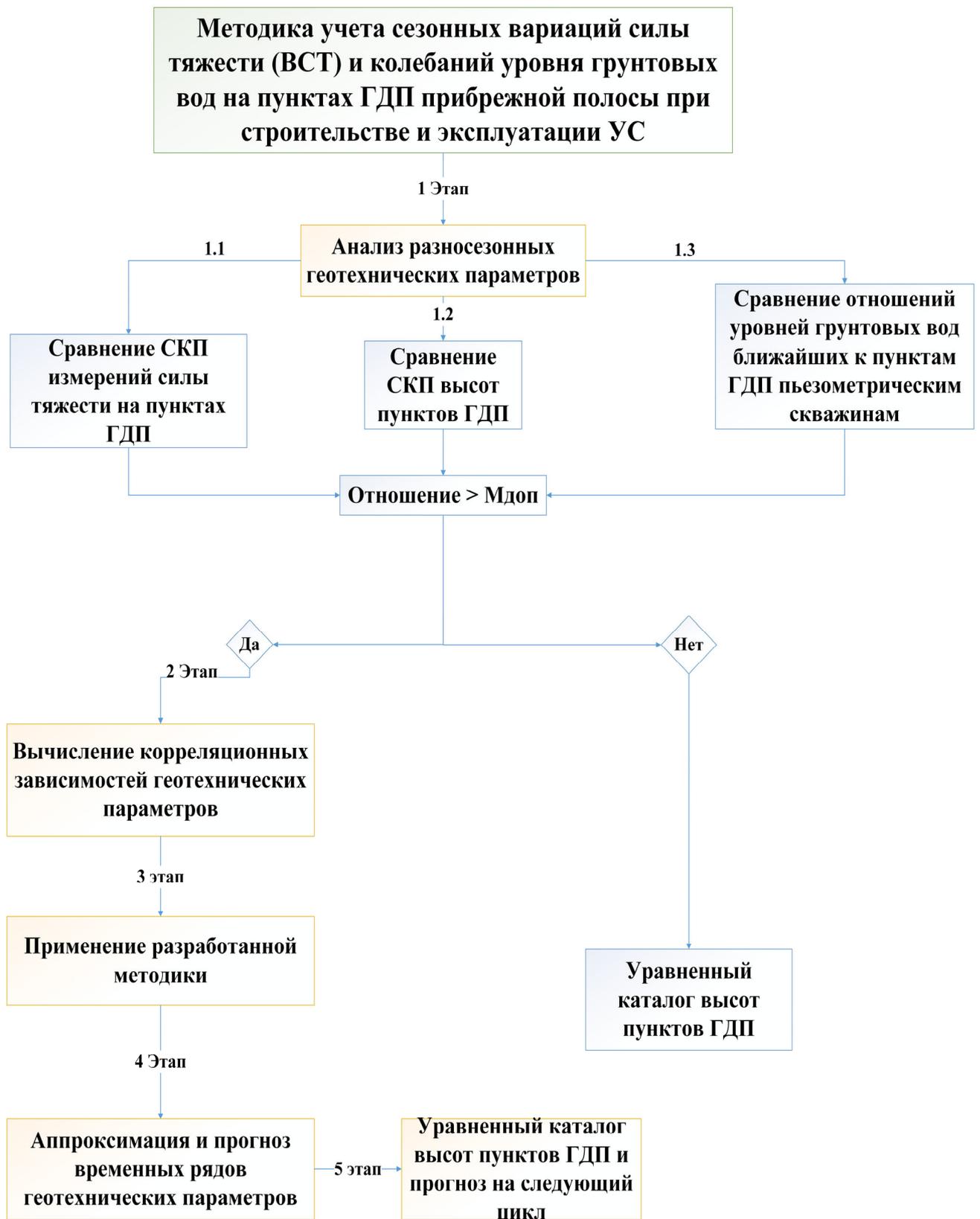


Рисунок 4.1 – Разработанный алгоритм применения методики учета геотехнических параметров  $\Phi$  ( $\Delta G_P$ ,  $\Delta F$ ) и  $T$  ( $\Delta H$ ,  $\Delta G_P$ ,  $\Delta F$ ) на пунктах ГДП

#### 4.1 Учет вариации силы тяжести с помощью локальной гравиметрической карты на площадке строительства уникальных сооружений

Гравиметрические карты составляют на различные области земной поверхности, начиная с небольших участков детальной съёмки и заканчивая обширными территориями, охватывающими целые страны и континенты.

Используя данные, полученные в разделах 3 и 2.4.2 возможно использовать плотность, полученную по результатам геологических и геофизических исследований, а также сферические сегменты вместо плоскопараллельных слоев.

За толщину промежуточного слоя принимают высоту пункта.

Вариант детального учета топографических масс представлен в 2.4.2.

С учетом полученных данных в разделе 3 и того факта, что в значения измеренных значений сил тяжести введена поправка за вертикальный градиент, вычислим поправку за толщину топографических масс (редукция Буге) (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Вычисление смешанной аномалии силы тяжести в свободном воздухе и аномалии силы тяжести в редукции Буге с использованием средней плотности грунта, полученной на площадке

Пункт	$H^y$ , м	$g - (\gamma + \Delta_1\gamma_{CB})$ , мГал	$\Delta_2g_B$ , мГал	$g - (\gamma + \Delta_1\gamma_{CB}) - \Delta_2g_B$ , мГал
PG01	13,546	-18,137	1,016	-19,153
PG02	17,840	-18,975	1,338	-20,313
PG03	12,246	-15,656	0,918	-16,575
PG04	12,920	-15,437	0,969	-16,406
PG05	11,564	-15,463	0,867	-16,330
PG06	13,931	-22,759	1,045	-23,804
PG07	15,420	-24,018	1,157	-25,175
PG08	15,488	-21,710	1,162	-22,871
PG09	15,572	-16,984	1,168	-18,151
PG10	12,993	-15,978	0,974	-16,953
PG11	14,307	-16,057	1,073	-17,130
PG12	12,687	-15,574	0,952	-16,526
PG13	12,017	-14,036	0,901	-14,938
PG14	12,485	-14,997	0,936	-15,933
PG15	12,697	-15,362	0,952	-16,314
PG16	13,616	-15,514	1,021	-16,535
PG17	13,896	-16,094	1,042	-17,136
PG18	14,048	-15,858	1,054	-16,911

Пункт	$H^y$ , м	$g - (\gamma + \Delta_1\gamma_{CB})$ , мГал	$\Delta_2g_B$ , мГал	$g - (\gamma + \Delta_1\gamma_{CB}) - \Delta_2g_B$ , мГал
PG19	13,917	-17,292	1,044	-18,336
PG20	14,780	-19,778	1,109	-20,887
PG21	16,225	-22,094	1,217	-23,311
PG22	13,942	-17,340	1,046	-18,386
PG23	13,195	-15,449	0,990	-16,438
PG24	13,302	-15,390	0,998	-16,388
PG25	13,618	-14,433	1,021	-15,455
PG26	13,693	-14,124	1,027	-15,151
PG27	14,622	-14,983	1,097	-16,080
PG28	13,522	-15,187	1,014	-16,201
PG29	не наблюдался	Не вычислялся	Не вычислялся	Не вычислялся
PG30	не наблюдался	Не вычислялся	Не вычислялся	Не вычислялся
PG31	не наблюдался	Не вычислялся	Не вычислялся	Не вычислялся
PG32	не наблюдался	Не вычислялся	Не вычислялся	Не вычислялся
PG33	не наблюдался	Не вычислялся	Не вычислялся	Не вычислялся
PG34	не наблюдался	Не вычислялся	Не вычислялся	Не вычислялся

Исходя из геологических данных (см. таблицу 2.2) и выводов по мощности, глубине и типу грунта, средняя плотность топографических масс  $\delta = 1.79 \text{ г/см}^3$ .

Отрисовка изоаномал производилась с помощью САД Autocad Civil3D (рисунок 4.2).

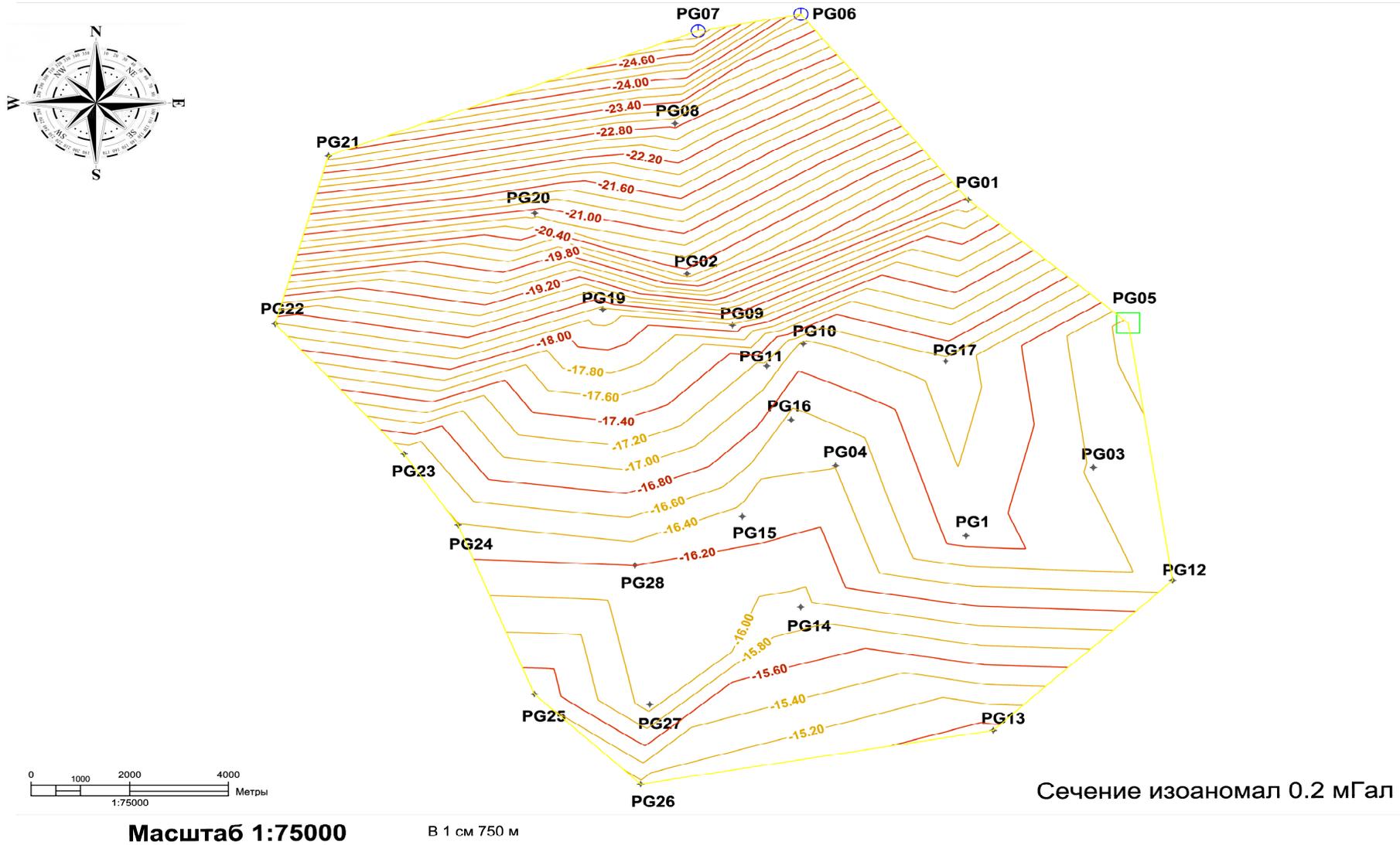


Рисунок 4.2 – Схема аномалий силы тяжести в редукции Буге в масштабе 1 : 75 000

#### 4.1.1 Вычисление уклонений отвесных линий в плоскости первого вертикала и в плоскости меридиана при помощи палетки Еремеева

Вычислим для пункта PG11, находящегося в центре площадки, составляющие уклонения отвеса в плоскости первого вертикала ( $\eta$ ) и меридиана ( $\xi$ ).

Для этого необходимо разбить территорию вокруг этого пункта на зоны и секторы.

Радиус зон составил примерно 1 км (центральная зона  $r_0$ ), 1350 м, 1950 м, 2850 м, 4350 м, 5300 м., 6225 м., 7400 м, 8325 м (зоны  $r_k$ ).

Обработка ведомости производилась по следующему алгоритму.

1 Для центральной области (0-я строка) вычисляются две суммы для  $\xi$  и две суммы для  $\eta$  и записываются под коэффициентами 0,0186 и 0,0263 в столбцах  $\Sigma\Sigma_\xi$  и  $\Sigma\Sigma_\eta$ . Перемножение полученных сумм на соответствующие коэффициенты дает два значения  $\xi$  и два значения  $\eta$ , которые записываются над коэффициентами. Сумма двух  $\xi$  и двух  $\eta$  определяет влияние аномалий центральной области на уклонение отвеса и записывается внизу для  $\xi_{0-5}$  и  $\eta_{0-5}$ .

2 Для 1-й области вычисляются суммы аномалий по каждому столбцу ( $k$ ) и по каждой строчке и записываются в строку  $\Sigma_k$  и в столбец  $\Sigma_i$ . Контролем этих вычислений является равенство. Контрольная сумма записывается в пересечение строки  $\Sigma_i$  и столбца  $\Sigma_i$ .

3 Для каждой группы вычисляются двойные суммы для  $\xi$  -- и двойные суммы для  $\eta$ . Значения двойных сумм записываются под соответствующими коэффициентами 0,0046, 0,0019 и т.д. Для контроля в 1, 2 и 3-й группе вычисляются разности  $\Sigma_{k=9} - \Sigma_{k=1}$ ,  $\Sigma_{k=10} - \Sigma_{k=2}$  и  $\Sigma_{k=11} - \Sigma_{k=3}$ , которые записываются в последней строке 7, 6 и 5-го столбцов, и соответствующие им суммы  $\Sigma\Sigma_{\xi 1} + \Sigma\Sigma_{\eta 1}$ ,  $\Sigma\Sigma_{\xi 2} + \Sigma\Sigma_{\eta 2}$  и  $\Sigma\Sigma_{\xi 3} + \Sigma\Sigma_{\eta 3}$ , которые записываются в последней строке соответствующих столбцов. Должны выполняться равенства  $2 \cdot (\Sigma_{k=9} - \Sigma_{k=1}) = \Sigma\Sigma_{\xi 1} + \Sigma\Sigma_{\eta 1}$ ,  $2 \cdot (\Sigma_{k=10} - \Sigma_{k=2}) = \Sigma\Sigma_{\xi 2} + \Sigma\Sigma_{\eta 2}$  и

$2 \cdot (\sum_{k=11} - \sum_{k=3}) = \sum \sum \xi_3 + \sum \sum \eta_3$ . Для каждой группы двойные суммы для  $\xi$  и  $\eta$  умножаются на соответствующий коэффициент и записываются над ним. Таким образом получают четвертое значения  $\xi$  и  $\eta$ , определяющих влияние аномалий соответствующих секторов четырех групп на уклонение отвеса. Их сумма для  $\xi$  и  $\eta$  определяет влияние аномалий 1-й области на уклонение отвеса и записывается для  $\xi_{975-8325}$  и  $\eta_{975-8325}$ .

Исходными данными послужили снятые с полученной гравиметрической карты на площадке строительства аномалии силы тяжести (рисунок 4.3).

По полученным данным УОЛ для центральной и дальних зон была составлена таблица 4.2.

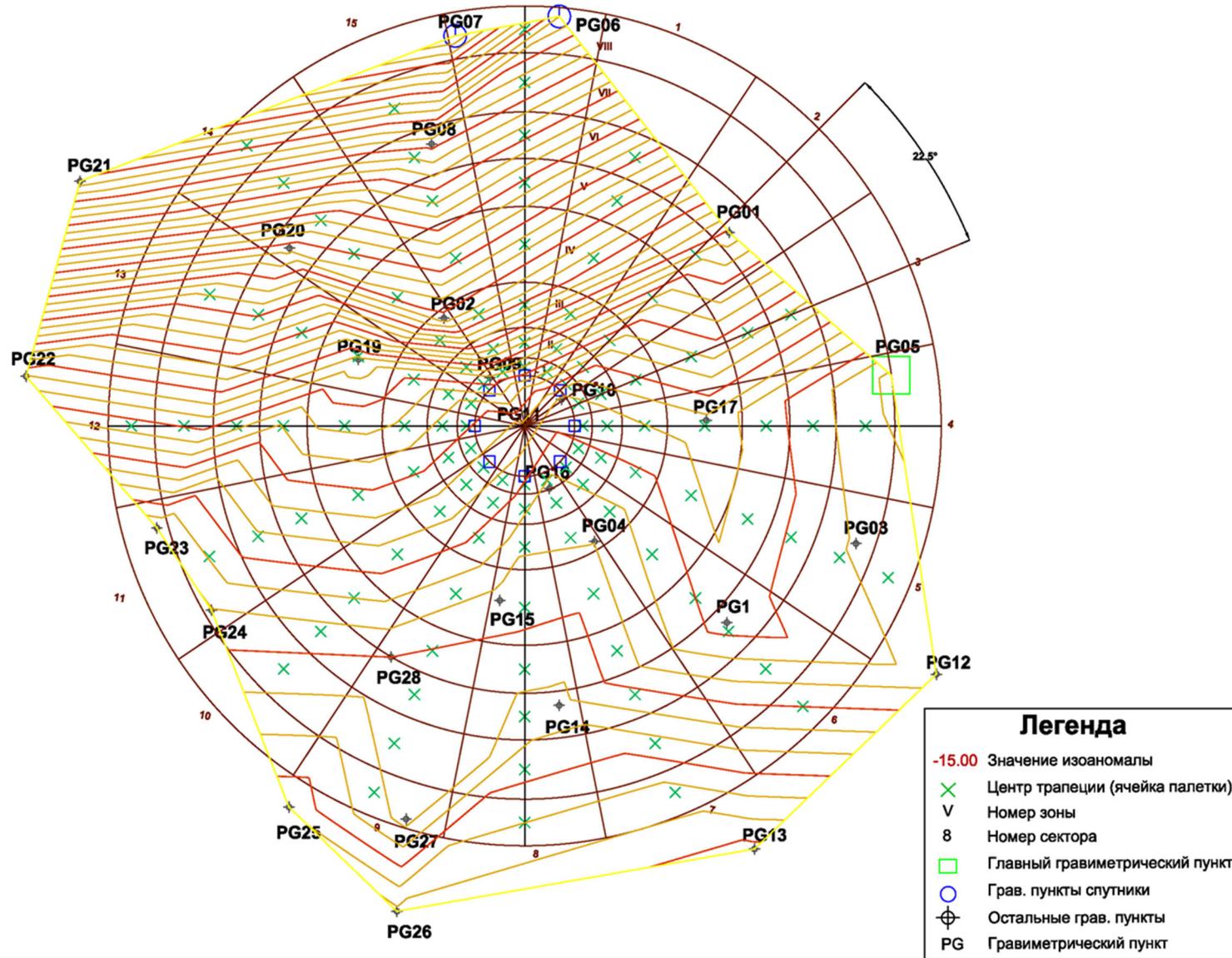


Рисунок 4.3 – Схема гравиметрической карты с нанесенными центрами трапеций для палетки Еремеева

Таблица 4.2 – Окончательное значение гравиметрических уклонений отвесной линии для пункта УС

Зона	$\xi''$	$\eta''$
Центральная зона 0 – 1 км	0,053	-0,035
1 – 10 км	0,187	-0,442
$\sum$ 0–10	0,241	-0,477

#### 4.1.2 Вычисление высот квазигеоида (аномалий высот) на площадке строительства

Для вычислений аномалии высот в зоне до 1 км получаем формулу для вычисления аномалий высот в центральной зоне

$$\zeta_0 = \frac{r_0}{2\gamma} \Delta g_0 + \frac{r_0}{2m\gamma} \sum_{k=1}^{k=m} \Delta g_k, \quad (4.1)$$

где  $m = 8$  – число секторов, номера которых: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16;

$\Delta g_k$  – значения  $\Delta g$  в точках секторов на окружности  $r_0$

$A_k = \frac{k \cdot \pi}{4}$  – Азимуты точек в секторах на окружности  $r_0$ ;

$k$  – порядковый номер сектора (1, 2, 3... $m$ );

$\gamma$  – нормальное значение силы тяжести. Для каждого пункта вычислено согласно таблице 4.2.

Для вычисления аномалий высот в зонах от 975 м до 8 325 м необходимо воспользоваться функцией Веннинг – Мейнеса. С учетом того, что наша область интегрирования не будет превышать 100 км (в нашем случае и 10 км), функцию Веннинг – Мейнеса можно упростить, разложив в ряд. Используя только первый порядок малости, получаем

$$Q_1 = \frac{\rho''}{2\gamma} \left( \frac{2}{\varphi^\circ} + \frac{42}{12} \varphi^\circ + 3 \right), \quad (4.2)$$

где  $\rho'' = 206265$ ;

$\gamma$  – вычисленное значение нормальной силы тяжести с учетом аномалии Буге и редукции в свободном воздухе мГал;

$R$  – радиус Земли, равный 6 371 км;

$\varphi^\circ$  – угловое расстояние.

Заменив угловое расстояние  $\varphi^\circ$  линейной величиной  $r$  (дуга большого круга), получаем формулу

$$\varphi^\circ = \frac{360 \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot R}. \quad (4.3)$$

Подставим полученное в формуле (4.3) выражение в (4.2), получаем

$$Q_1 = \frac{\rho''}{2\gamma} \left( \frac{4\pi R}{360} \cdot \frac{1}{r} + \frac{49}{12} \cdot \frac{360}{2\pi R} \cdot r + 3 \right). \quad (4.4)$$

Выполним упрощение формулы (4.4). Вычислим коэффициенты перед переменными и обозначим их через А, В, С. Тогда формула (4.2) примет вид

$$Q_1 = \frac{A}{r} + B \cdot r + C, \quad (4.5)$$

где  $A = 1339.600$ ;

$B = 66 \cdot 10^{-6}$ ;

$C = 0,315$ .

Окончательная формула для вычисления высот квазигеоида (аномалии высоты) примет вид

$$(\zeta_{975-8325})_M = \frac{1}{2\pi\gamma} \cdot \int_{r=975}^{r=8325} \int_0^{2\pi} \Delta g \cdot F(r) \cdot dr \cdot dA, \quad (4.6)$$

где  $F(r) = A \cdot \ln r + \frac{B}{2} \cdot r^2 + C \cdot r$ .

После подстановки коэффициентов (А, В, С) формула (4.6) принимает вид

$$\begin{aligned}
 (\zeta_{975-8325})_M = & (15 \sum_1^{16} \Delta g_I + 22 \sum_1^{16} \Delta g_{II} + \\
 & 32 \sum_1^{16} \Delta g_{III} + 47 \sum_1^{16} \Delta g_{IV} + 69 \sum_1^{16} \Delta g_V + \\
 & 101 \sum_1^{16} \Delta g_{VI} + 149 \sum_1^{16} \Delta g_{VII} + 219 \sum_1^{16} \Delta g_{VIII}).
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

Сводная ведомость вычислений аномалий высот в пункте PG11, центральной и дальней области приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сводная ведомость вычислений аномалий высот ближней зоны и дальних зон

Область интегрирования	$\xi$ , м
I	-0,041
II	-0,061
III	-0,091
IV	-0,136
V	-0,201
VI	-0,277
VII	-0,353
VIII	-0,317
$\sum \Delta g_{I-VIII}$	-1,479

#### 4.2 Вычисление УОЛ и их разности по палетке Еремеева и ввод поправок в измеренное превышение

По результатам 4.1 для дальних зон (0–8325) с учетом полученного УОЛ поправка в измеренные превышения

$$\begin{aligned}
 \Delta H = \Delta h - v \cdot b = \Delta h - \\
 8325 \cdot (0.6''/206265) = \Delta h - 0,022 \text{ м.}
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Для дальней зоны поправка за влияние уклонения отвесной линии ( $v$ ) в измеренное превышение ( $\Delta h$ ) будет достигать 22 мм, что является существенной величиной для линии нивелирного хода порядка 10 км.

Однако применять такую поправку с учетом ошибок интерполяции достаточно рискованно. Поправки к превышениям и их сезонная разность представлены в таблице 4.4.

Выполним вычисление поправок для линий нивелирования экспериментального полигона (центр в пункте PG11), представленном на рисунке 4.4.

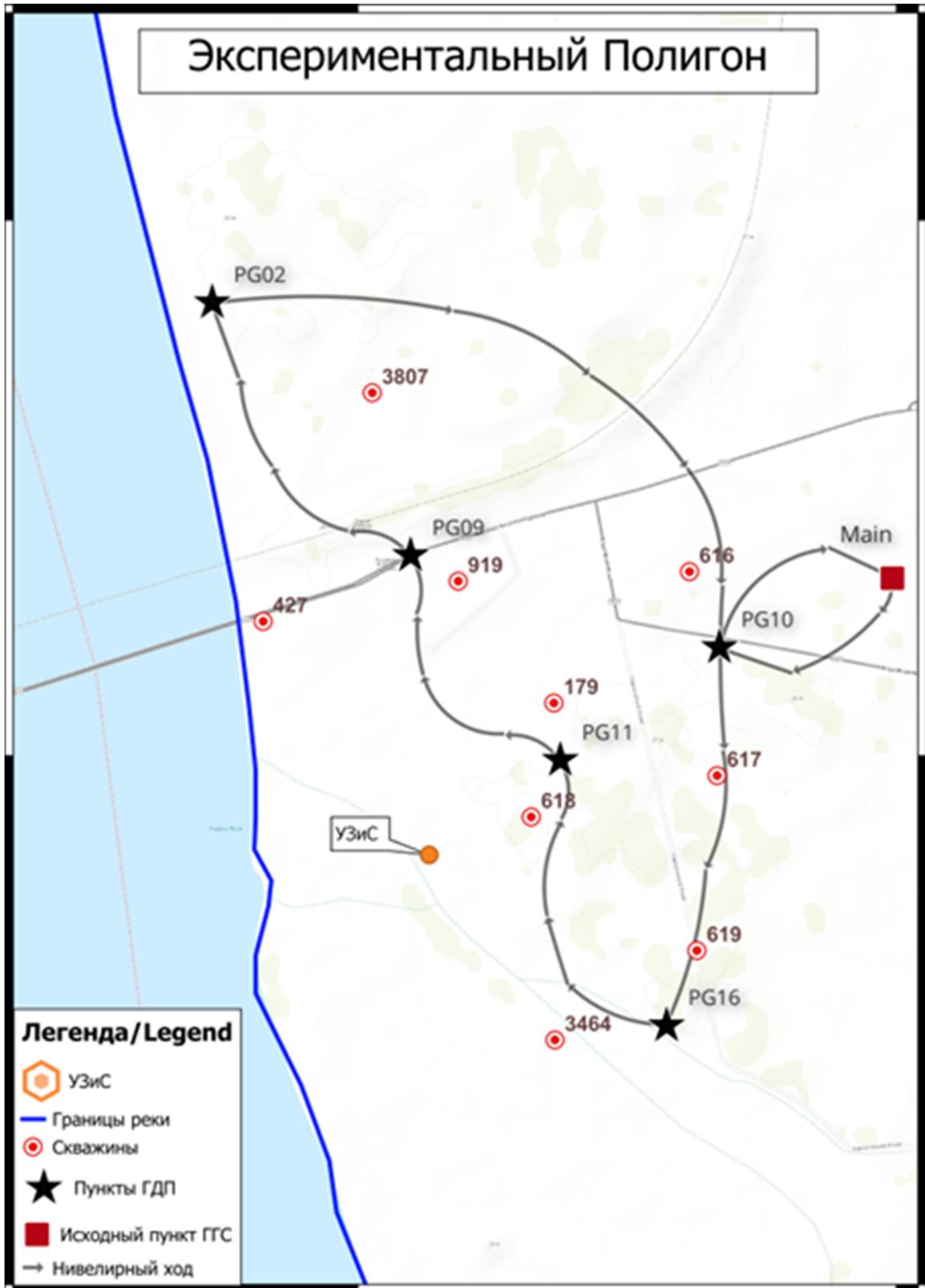


Рисунок 4.4 – Экспериментальный полигон для учета ВСТ

Таблица 4.4 – Поправки в превышения за ВСТ и их сезонные вариации через УОЛ

Ветка	Поправка при максимуме грунтовых вод, мм	Поправка при минимуме грунтовых вод, мм	Разность сезонных поправок за ВСТ, мм
PG10 - PG16	4,63	4,61	0,02
PG16 – PG11	3,46	3,44	0,02
PG11 - PG09	3,07	3,05	0,02
PG09 - PG02	3,89	3,87	0,02
PG11 - PG10	2,36	2,35	0,01
PG02 - PG10	7,41	7,37	0,04

Разность поправки в измеренное превышение за ВСТ с применением палетки ( $\Delta H^{\text{Ерем}}$ ) будет на примере

$$\Delta H_{PG09-Pg11}^{\text{Ерем}} = \Delta H_{\text{макс}} - \Delta H_{\text{мин}} = 0,02 \text{ мм.} \quad (4.9)$$

ВСТ на обоих пунктах прослеживается (см. таблицу 3.16) от сезона и равна -121 мкГал для PG02 и -87 мкГал для PG11 соответственно.

Следует отметить, что несмотря на небольшую область исследования (локальную), присутствуют ошибки интерполирования, которые невозможно исключить, кроме как увеличив частоту размещения гравиметрических пунктов.

#### 4.3 Вычисление поправки в измеренное превышение и их разности для перехода к разностям нормальных высот

Для вычисления поправки и разности поправок в разные сезоны года воспользуемся формулами, приведенными в 2.4.5.

Аналогично 4.2, вычисление необходимых переменных выполнялось при условии постоянства географических координат. Тогда, применяя формулы (2.19) и (2.20), получаем разность поправок в измеренное превышение линии PG02 – PG11

$$\Delta H_{PG2-Pg11}^{1971} = \Delta H_{\text{макс}} - \Delta H_{\text{мин}} = 0,00 \text{ мм.} \quad (4.10)$$

При этом сама поправка в измеренное превышение стремится к нулю.

#### 4.4 Учет геотехнических параметров в результатах геодезических измерений

##### 4.4.1 Анализ многолетних геотехнических наблюдений

Предпосылками для создания новой методики по учету комплексных факторов и внесения коррекций в результаты геодезических наблюдений послужили:

1) неоднозначность традиционных методик подсчета поправок в измеренные превышения. Получены разные значения поправок (4.2, 4.3);

2) отстраненность традиционных методов учета ВСТ от других геотехнических параметров. Предлагаемые методы эффективно работают на больших расстояниях с плотной сетью гравиметрических пунктов;

3) необходимость учета ВСТ на локальном участке с оценкой необходимости применения поправки и анализом исходной сети ГДП;

4) скачкообразное изменение высот (нормальных и геодезических) в период экстремумов уровня грунтовых вод.

В таблице 4.5 и на рисунке 4.2 представлено сравнение изменения нормальных высот за все время наблюдений (по пять циклов в каждый сезон года) систем «максимум – минимум» и «минимум – минимум» уровня грунтовых вод.

В качестве пунктов исследования применялись пункты, удовлетворяющие выбранному нами критерию в 3.1.3.

Таблица 4.5 – СКП многолетних разностей уравненных высот при двух состояниях уровня грунтовых вод (максимум – минимум) и (минимум – минимум)

№ пункта	СКП (максимум – минимум), мм	СКП (минимум – минимум), мм	Отношение СКП разносезонных наблюдений за весь промежуток
PG08	8,7	3,3	3,3
PG02	2,7	3,5	0,7
PG09	9,0	5,4	1,6
PG10	-	-	-
PG11	8,5	4,2	1,7
PG13	3,3	2,3	1,5

№ пункта	СКП (максимум – минимум), мм	СКП (минимум – минимум), мм	Отношение СКП разносезонных наблюдений за весь промежуток
PG14	3,1	1,6	1,8
PG15	3,6	3,8	0,9
PG16	-	-	-
PG19	26,6	19,0	1,3
PG20	9,1	4,0	2,1
PG21	6,6	4,0	1,6
PG23	8,0	4,6	1,7
PG27	6,2	6,1	1,0
PG28	4,9	4,0	1,3

Вычислим относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений нормальных высот пунктов ГДП (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Средний относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений нормальных высот пунктов ГДП

Средний относительный показатель изменения СКП наблюдений нормальных высот в разные сезоны, крат	2,1
--	-----

Количество пунктов, находящихся в критерии и подвергающихся амплитудному изменению уравнированных высот, составляет 80 %.

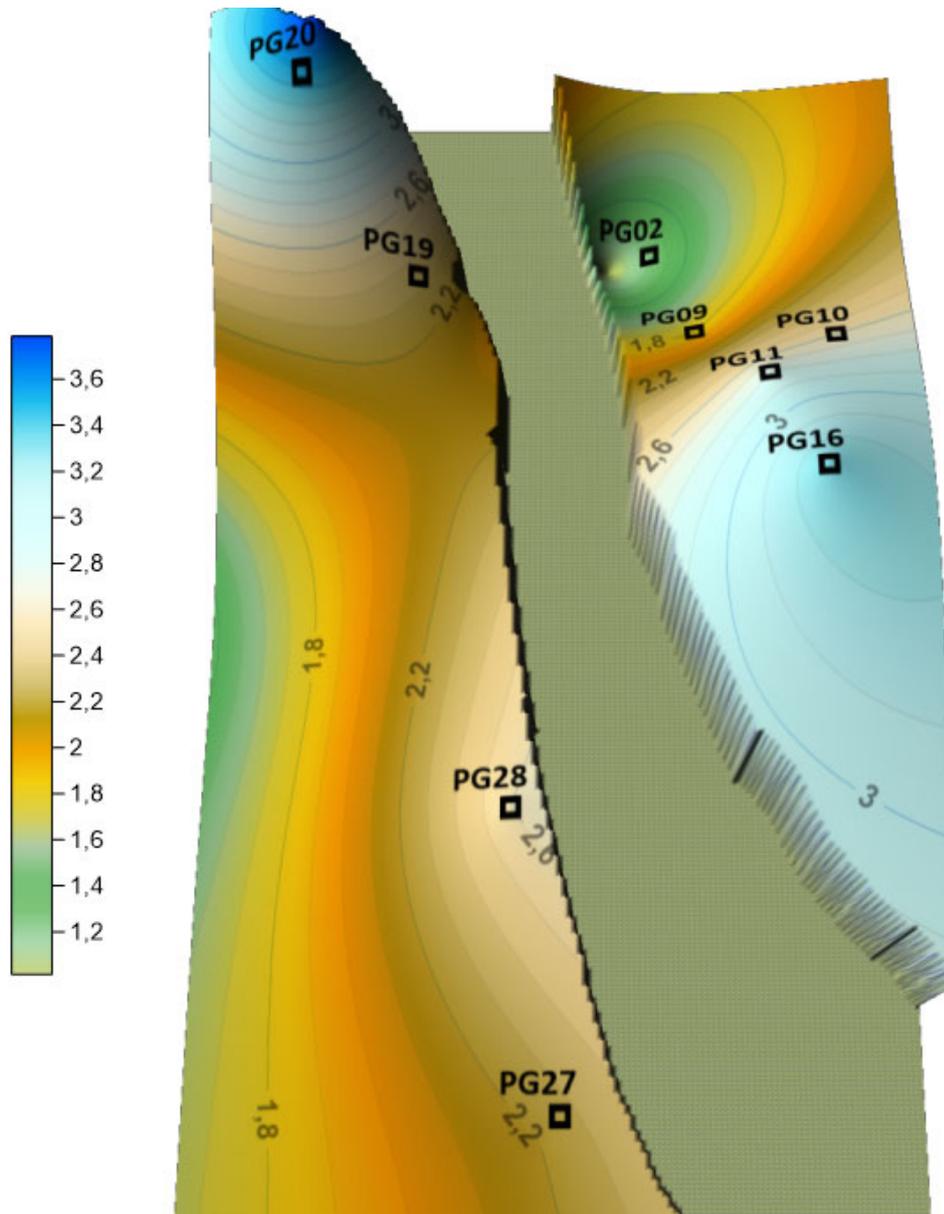


Рисунок 4.5 – Средний относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений нормальных высот пунктов ГДП

Анализ СКП разностей значений силы тяжести и их отношений за все время наблюдений (порядка шести циклов наблюдений) представлен в таблице 4.7 и на рисунке 4.6.

Таблица 4.7 – СКП многолетних разностей силы тяжести при двух состояниях (максимум – минимум) и (минимум – минимум)

№ пункта	СКП (максимум – минимум), мм	СКП (минимум – минимум) , мм	Отношение СКП разносезонных наблюдений за весь промежуток
PG08	22	11	0,5
PG02	30	102	3,4
PG09	17	36	2,1
PG10	22	36	1,6
PG11	30	69	2,3
PG13	18	70	3,8
PG14	19	60	3,2
PG15	23	73	3,2
PG16	21	37	1,8
PG19	23	20	0,9
PG20	24	36	1,5
PG21	32	30	0,9
PG23	26	31	1,2
PG27	24	88	3,7
PG28	27	80	3,0

Средний относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений силы тяжести пунктов ГДП представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Средний относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений силы тяжести пунктов ГДП

Средний относительный показатель изменения СКП наблюдений силы тяжести в разные сезоны, крат	2,2
--	-----

Количество пунктов, находящихся в критерии и подвергающихся скачкообразному изменению уравнированных высот, составляет 80 %.

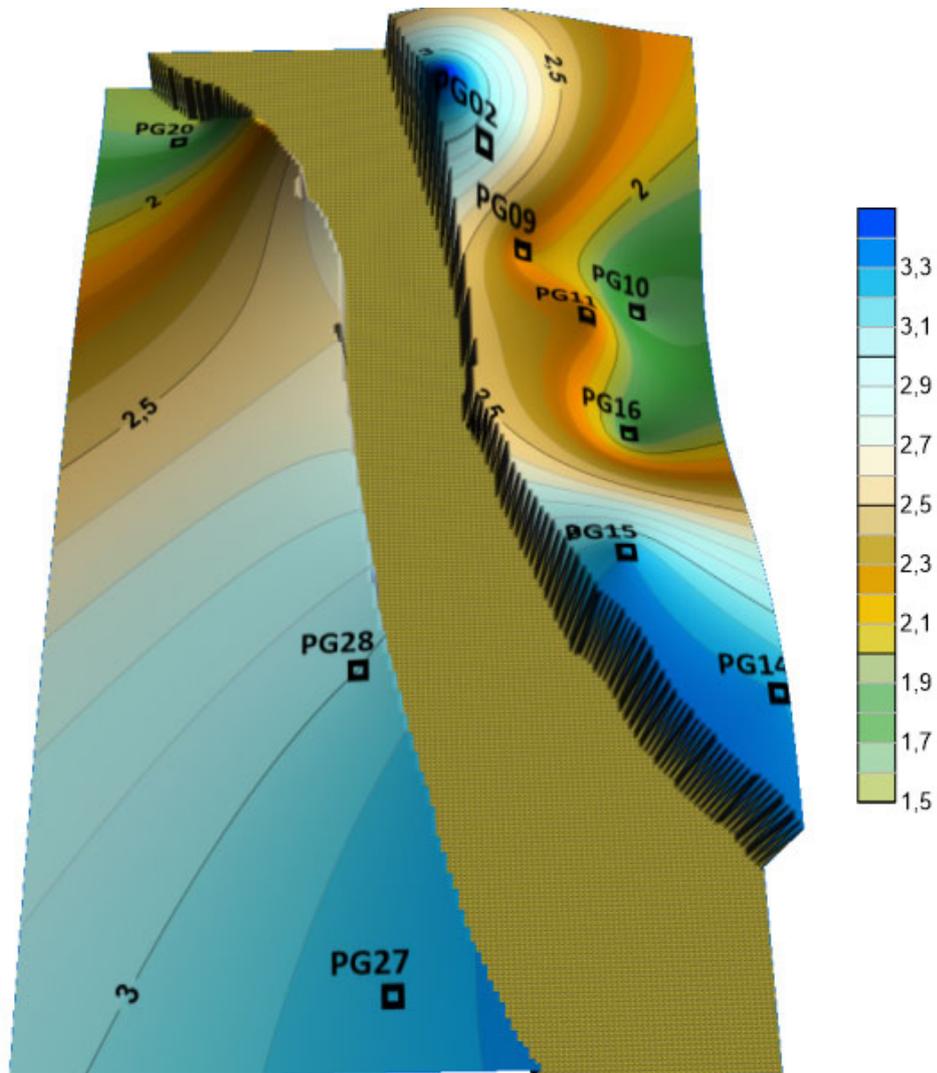


Рисунок 4.6 – Средний относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений силы тяжести пунктов ГДП

Анализ отношения СКП разностей геодезических высот немного отличается в связи с хаотичным расположением пунктов спутниковых наблюдений по ту сторону реки и менее пяти лет наблюдений. В результате отбраковки, в непосредственной близости к гравиметрическим пунктам остались следующие (рисунок 4.7 и таблица 4.9).

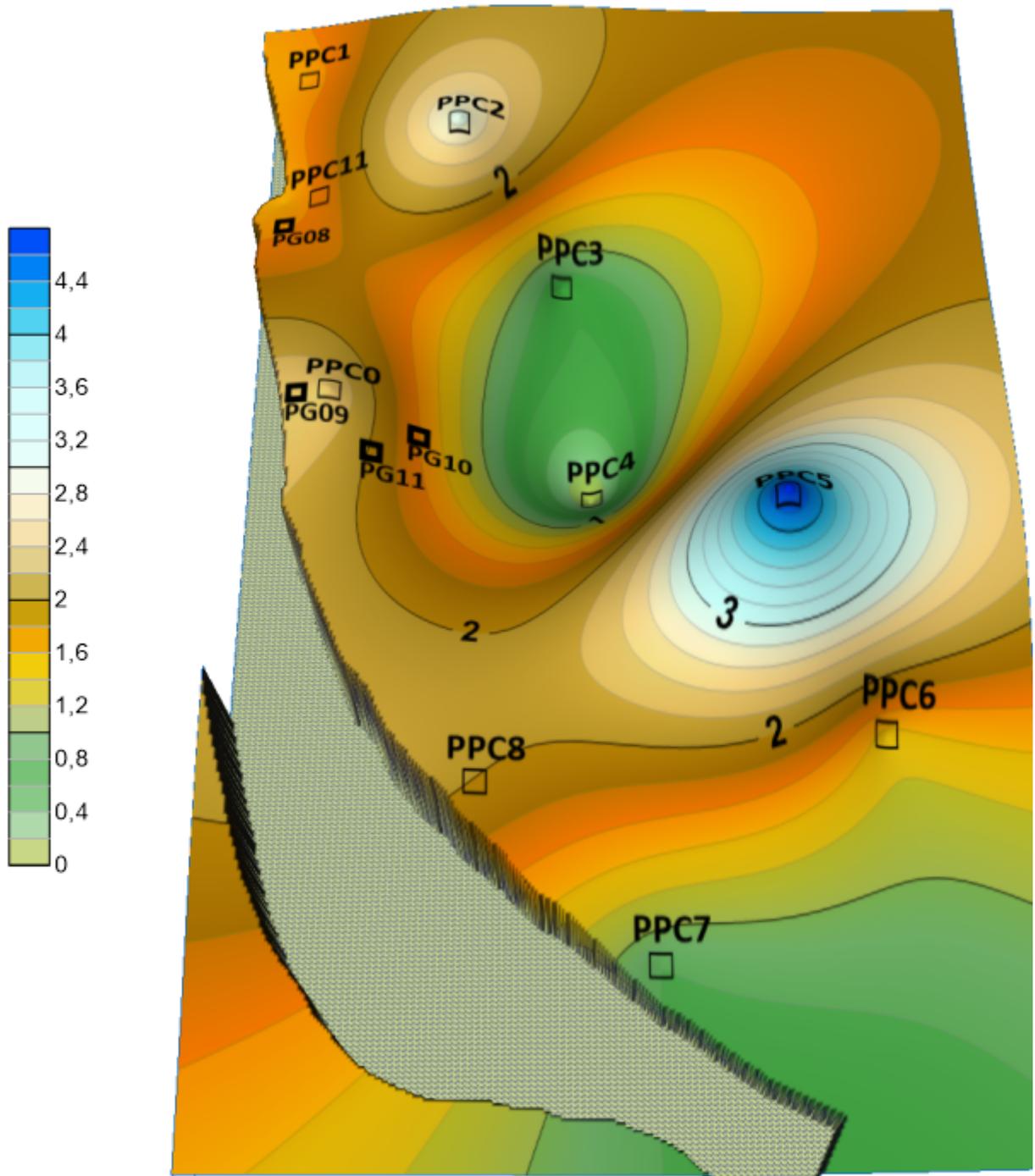


Рисунок 4.7 – Относительный показатель изменения уровня пьезометрических скважин и ближайших к ним пунктов ГДП

Таблица 4.9 – СКП многолетних разностей геодезических высот относительных наблюдений при двух состояниях (максимум – минимум) и (минимум – минимум)

№ пункта	СКП (максимум – минимум), мм	СКП (минимум – минимум) , мм	Отношение СКП разносезонных наблюдений за весь промежуток
PPC1	34,3	23,3	1,5
PPC2	14,8	5,1	2,9
PPC3	3,5	5,5	0,6
PPC4	-	-	-
PPC5	17,3	3,8	4,5
PPC6	18,0	14,1	1,3
PPC7	24,0	31,3	0,8
PPC8	12,5	5,7	2,2
PPC9	-	-	-
PPC0	14,7	6,0	2,4
PPC11	27,7	19,1	1,4
PPC13	20,1	9,6	2,1
PPC14	6,3	7,4	0,8
PPC15	36,5	55,2	0,7
PPC16	17,9	11,1	1,6
PPC17	16,2	26,3	0,6

Тогда относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений геодезических высот составляет (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений геодезических высот

Относительный показатель изменения СКП разносезонных наблюдений геодезических высот пунктов ГДП, крат	1,7
---	-----

Количество пунктов, находящихся в критерии и подвергающихся скачкообразному изменению уравнированных высот, составляет 64 %.

Параллельно с геодезическими и геофизическими наблюдениями выполнялось снятие отсчетов с автоматизированных уровнемерных постов.

В качестве отметок уровня грунтовых вод использовались скважины, распределенные по площадке строительства УС.

Средняя амплитуда изменения максимумов и минимумов уровня грунтовых вод на исследуемом участке строительства УС представлена в таблице 4.11 и рисунке 4.8.

Таблица 4.11 – Средняя амплитуда изменения уровня подземных вод по всем скважинам на площадке УС

Период наблюдений	Максимум (август – сентябрь), м	Минимум (март – апрель), м	Амплитуда, м
2016–2021	11,8	4,0	7,8

Учитывая хаотичное расположение скважин относительно ГДП, необходимо выполнить выборку ближайших скважин. В связи с этим было выбрано порядка 10 скважин, максимально близко расположенных к пунктам ГДП.

Результаты отношений разносезонных уровней грунтовых вод данных скважин представлены на рисунке 4.9 и в таблице 4.12.

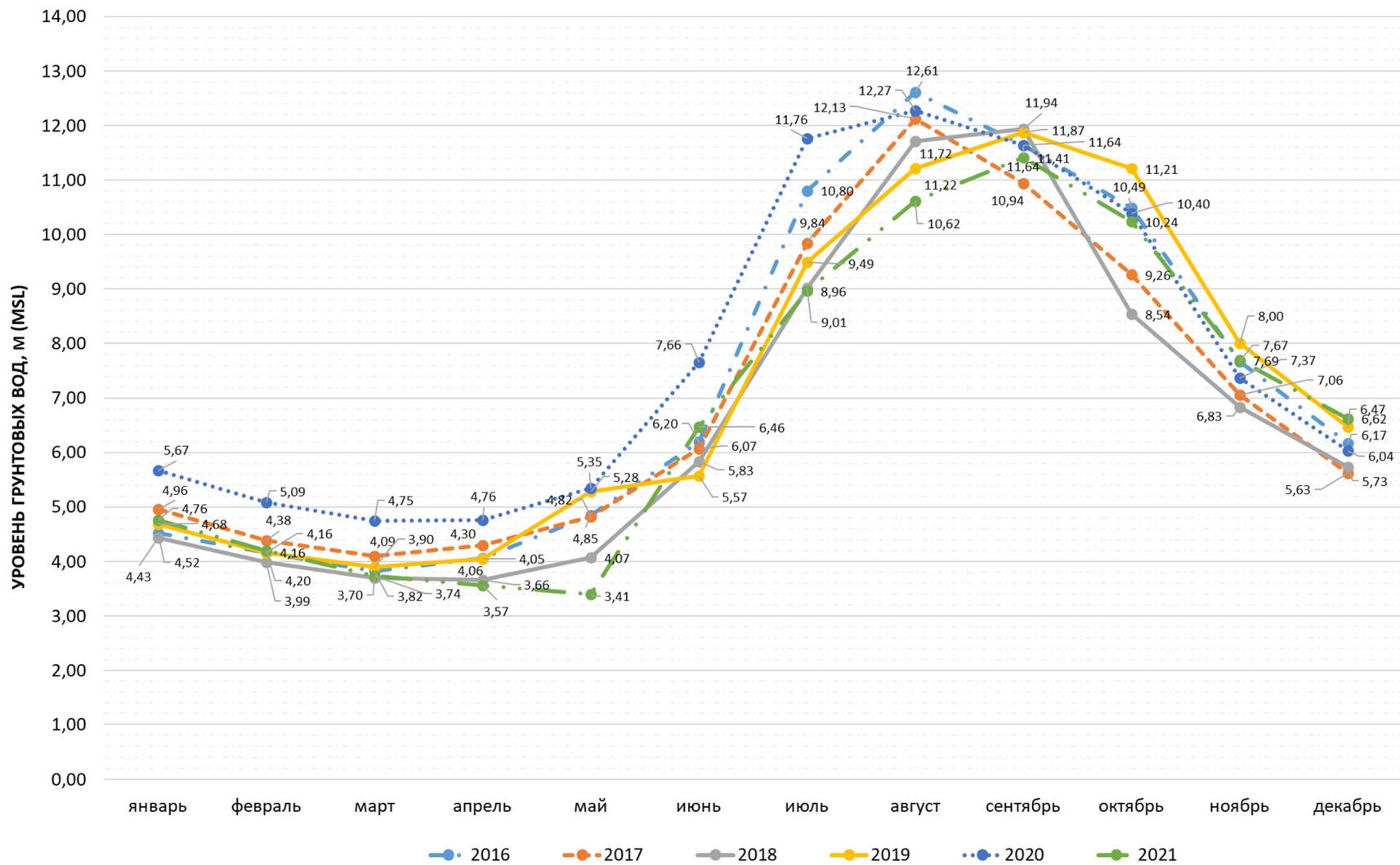


Рисунок 4.8 – Средний уровень грунтовых вод с 2016 по 2021 г.

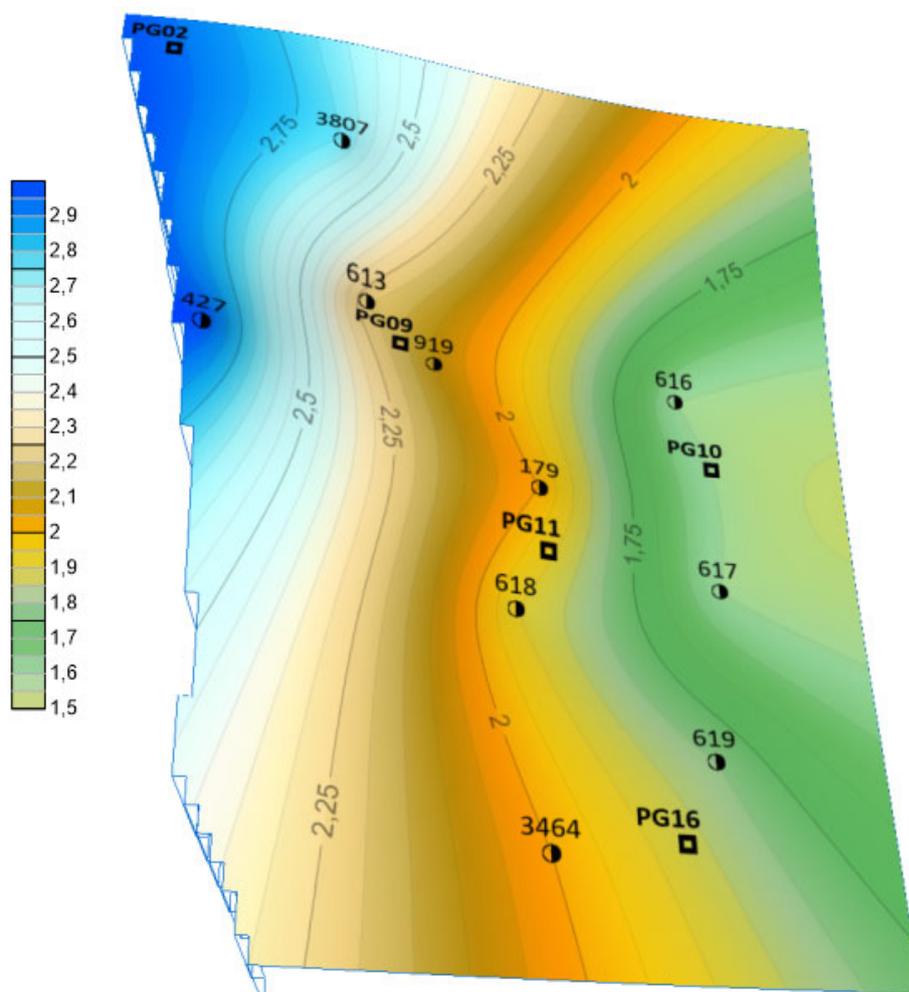


Рисунок 4.9 – Схема отношений разносезонных уровней пьезометрических скважин и ближайших к ним пунктов ГДП

Таблица 4.12 – Отношение многолетних разносезонных наблюдений пьезометрических скважин

№ скважины	Среднее значение (минимум), м	Среднее значение (максимум), м	Отношение разносезонных наблюдений за весь промежуток
613	5,2	11,6	2,2
427	4,35	12,7	2,9
919	3,5	5,5	2,1
616	6,4	10,4	1,6
617	6,35	10,4	1,6
618	5,8	11,2	1,9
179	5,8	11,4	2,0
619	6,3	11,5	1,8
3464	5,9	11,8	2,0
3807	4,4	11,8	2,7

Среднее арифметическое отношений разносезонных уровней грунтовых вод представлено в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Относительный показатель изменения уровня пьезометрических скважин и ближайших к ним пунктов ГДП

Средний относительный показатель изменения уровня грунтовых вод в разные сезоны, крат	2,1
---	-----

Количество скважин, находящихся в критерии и подвергающиеся скачкообразному изменению уровня грунтовых вод, составляет 100 %.

Итоговые отношения разносезонных наблюдений представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Итоговая таблица отношений исследуемых геотехнических параметров

Гравиметрический пункт ГДП и ближайшие к ним пункты спутниковой сети и скважины	Средний относительный показатель изменения СКП нормальных высот, крат	Средний относительный показатель изменения СКП силы тяжести, крат	Средний относительный показатель изменения СКП геодезических высот, крат	Средний относительный показатель изменения уровня грунтовых вод, крат
PG08	2,2	0,5	1,4	-
PG02	1,0	3,4	-	2,5
PG09	1,8	2,1	2,4	2,2
PG10	2,6	1,6	-	1,6
PG11	2,8	2,3	-	2,0
PG13	1,5	3,8	0,8	-
PG14	1,8	3,2	2,2	-
PG15	0,9	3,2	-	-
PG16	3,3	1,8	-	1,9
PG19	2,2	0,9	-	-
PG20	3,8	1,5	-	-
PG21	2,1	0,9	-	-
PG23	0,8	1,2	-	-
PG27	2,2	3,7	-	-
PG28	2,6	3,0	-	-
Среднее	2,1	2,2	1,7	2,0
Оценка подверженности сезонным колебаниям (коэффициент более 1,3)	80	80	93	100

Как видно из рисунка 4.9 и таблицы 4.12, рядом со скважинами находятся всего пять гравиметрических пунктов ГДП, в связи с чем методика будет рассмотрена для этих пунктов, однако уровень грунтовых вод на самих скважинах нам неизвестен. Поэтому сначала рассмотрим методику вычисления уровня грунтовых вод на пунктах ГДП в 4.4.2.

#### 4.4.2 Методика вычисления уровня грунтовых вод на пунктах ГДП

В связи с тем, что в открытых источниках не было найдено четких рекомендаций по удалению скважин друг от друга, данный вопрос задавался экспертам, на что был получен ответ, что нет такого обязательного норматива. Документ [71] не содержит такого требования, равно как и профильные документы [64, 66]. На данный момент нет никакого требования или рекомендаций по установке скважин рядом с пунктами ГДП, что позволило бы напрямую брать отчеты.

В связи с этим был разработан алгоритм подсчета уровня грунтовых вод на пунктах ГДП.

В качестве теоретической базы алгоритма применялись методические указания [49].

Представленные скважины можно рассматривать как локальные специализированные наблюдательные сети. Рекомендуемое расстояние между расчетными скважинами может быть от 50 (не более 300 м).

Оптимальное расстояние между скважинами определяется необходимостью получения достаточной разности их уровней в направлении движения подземных вод, обеспечивающей минимальные ошибки при расчетах инфильтрации, бокового оттока и гидрогеологических параметров, вызываемые неточностью замеров уровней.

При ошибках в определении разностей уровней 5–10 % и точности замеров  $\pm 1$  см необходимая величина разностей уровней в соседних скважинах должна быть не менее 0,2 м [30]. На основе вышеизложенных данных:

1) в случае равномерного покрытия пьезометрическими скважинами следует применять в качестве критерия - изменение гидроизоаномал не более 0,2 м (r);

2) в случае неравномерного покрытия следует применять в качестве критерия расстояние от пункта ГДП до скважины ( $S$ ).

Выполнив исследования изменения уровня грунтовых вод от скважины 427 до 919 и 613, получаем следующие.

Уровень грунтовых вод меняется на 1 м при расстоянии между скважинами 500 м (533 м). Полученные данные подтверждают изменение гидроизоаномал на 0,2 м на 100 м.

Тогда вес ( $P_i$ ) как меру надежности через изменение гидроизоаномал представим по формуле

$$P_i^r = \frac{c_1}{r}, \quad (4.11)$$

где  $c_1$  – единица веса 0,2;

$r$  – разность гидроизоаномал от скважины до пункта

С использованием расстояния  $S$  формула подсчета будет

$$P_i^S = \frac{c_2}{S}, \quad (4.12)$$

где  $c_2$  – единица веса 100;

$S$  – расстояние от скважины до пункта.

Необходимо учесть, что формула (4.11) показывает хороший результат при ортогональном направлении от реки. В случае применения вдоль реки следует применять формулу (4.12). На примере скважин 616 и 617, расположенных вдоль реки, изменение гидроизоаномал составляет 0,1 м на 1 км.

Вычислим значения уровня грунтовых вод для пунктов PG02, PG09, PG10, PG11, PG16.

Тогда с учетом формул (4.11) и (4.12) получим формулы подсчета средневесовых значений уровня грунтовых вод на пункте ГДП:

$$H_{\text{ГДП}}^{\text{ГДП}} = \frac{[P_i^r \cdot H_i^{\text{СКВ}}]}{[P_i^r]}, \quad (4.13)$$

$$H_{\text{гр}}^{\text{ГДП}}(S) = \frac{[P_i^S \cdot H_i^{\text{СКВ}}]}{[P_i^S]}, \quad (4.14)$$

где  $P_i^r$  – вес  $i$  скважины через разность гидроизоаномал ( $r$ );

$P_i^S$  – вес  $i$  скважины через расстояние ( $S$ ) от нее до пункта ГДП;

$H_i^{\text{СКВ}}$  – уровень грунтовых вод  $i$  скважины;

$H_{\text{гр}}^{\text{ГДП}}(r)$  и  $H_{\text{гр}}^{\text{ГДП}}(S)$  – вычисленный уровень грунтовых вод на пунктах ГДП.

Полученные значения представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Вычисленный уровень грунтовых вод на пунктах ГДП

№ пункта	Вычисленный уровень грунтовых вод при минимуме ( $r$ ), м	Вычисленный уровень грунтовых вод при максимуме ( $r$ ), м	Вычисленный уровень грунтовых вод при минимуме ( $S$ ), м	Вычисленный уровень грунтовых вод при максимуме ( $S$ ), м	Разность (средняя по $r$ и $S$ )
PG09	5,22	11,64	5,24	11,78	6,48
PG10	6,39	10,40	6,39	10,39	4,00
PG11	5,76	11,31	5,76	11,31	5,55
PG16	6,07	11,63	6,11	11,60	5,52
PG02	4,41	10,89	4,41	10,89	6,48

Полученное СКП разностей ( $m_d$ ) рассчитывалось по следующей формуле и представлено в таблице 4.16:

$$m_d = \sqrt{\frac{[d_n]^2}{n}} \quad (4.15)$$

Таблица 4.16 – СКП между двумя методами вычисления уровня грунтовых вод на пунктах ГДП

СКП разностей грунтовых вод (минимум), м	СКП разностей грунтовых вод (максимум), м
0,02	0,07

Тогда, применяя данные таблицы 4.15, получим отношение значений уровня грунтовых вод на пунктах ГДП (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Отношение вычисленных уровней грунтовых вод на пунктах ГДП

№ Пункта	Отношение уровня грунтовых вод
PG09	2,2
PG10	1,6
PG11	2,0
PG16	1,9
PG02	2,5

Среднее отношение разносезонных уровней грунтовых вод на пунктах ГДП представлено в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Относительный показатель изменения уровня пьезометрических скважин

Средний относительный показатель изменения уровня грунтовых вод в разные сезоны, крат	2,0
---	-----

Количество пунктов, находящихся в критерии и подвергающихся скачкообразному изменению уровня грунтовых вод, составляет 100 %.

#### 4.5 Доказательство коррелированности данных от сезона наблюдений и методика учета ВСТ

Прогнозирование современных вертикальных движений земной поверхности (СВДЗП) в пространственном аспекте может выполняться как на основании результатов изучения общих закономерностей исследуемого процесса и применения его в прогнозируемых областях, так и методами аналогии путем установления соотношений и корреляционных связей между скоростями СВДЗП, геофизическими полями, историей развития и различными элементами геологических структур – мощностью земной коры, ее блоковой структурой и разломной тектоникой.

Как было сказано в предыдущих разделах, эффект от изменения гравитационного поля коррелирован с изменением уровня грунтовых вод на площадке строительства УС.

Статья [31] также подтверждает этот факт. В рамках исследования проведен корреляционный анализ разностей силы тяжести, уровня грунтовых вод и высот для пунктов, попадающих в критерий влияния вариаций силы тяжести (см. рисунок 3.1). Данные зависимости изменения силы тяжести и уровня грунтовых вод на экспериментальном полигоне представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Корреляционный анализ между изменениями уровня грунтовых вод и силы тяжести на пунктах ГДП экспериментального полигона

Время	Март – сентябрь 2020	март 2020 – апрель 2021	сентябрь 2020 - апрель 2021
ID			
PG02	0,9	0,9	0,9
PG09	0,9	0,9	0,9
PG10	0,9	0,9	0,9
PG11	0,9	0,9	0,9
PG16	0,9	0,9	0,9

Корреляционный анализ между силой тяжести и измеренными превышениями пунктов ГДП в критерии (рисунок 3.3) представлен в таблице 4.20.

Таблица 4.20– Корреляционный анализ между разностями силы тяжести и измеренными превышениями всех пунктов ГДП в критерии

Время	Март – сентябрь 2020	Март 2020 – апрель 2021	Сентябрь 2020 – апрель 2021
ID			
PG02	0,5	0,5	0,5
PG09	0,5	0,5	0,5
PG10	0,5	0,5	0,5
PG11	0,5	0,5	0,5
PG13	0,5	0,5	0,5
PG14	0,5	0,5	0,5
PG15	0,5	0,5	0,5
PG16	0,5	0,5	0,5
PG19	0,5	0,5	0,5
PG20	0,5	0,5	0,5

Время	Март – сентябрь	Март 2020 – апрель	Сентябрь 2020 – апрель
ID	2020	2021	2021
PG02	0,5	0,5	0,5
PG23	0,5	0,5	0,5
PG27	0,5	0,5	0,5
PG28	0,5	0,5	0,5

Корреляционный анализ между уравненными высотами пунктов ГДП и функцией  $\Phi$  ( $\Delta GP, \Delta F$ ) (этой функции будет посвящен следующий подраздел) представлен в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Корреляционный анализ между разностями уравненных высот пунктов ГДП и функцией  $\Phi$  ( $\Delta GP, \Delta F$ )

Время	Март – сентябрь	Март 2020 – апрель	Сентябрь 2020 – апрель
ID	2020	2021	2021
PG02	-0,5	-0,5	-0,5
PG09	-0,5	-0,5	-0,5
PG10	-0,5	-0,5	-0,5
PG11	-0,5	-0,5	-0,5
PG16	-0,5	-0,5	-0,5

Корреляционная связь между ближайшими к гравиметрическим пунктам ГДП и геодезическими высотами представлена в таблице 4.22.

Таблица 4.22 – Корреляционный анализ между силой тяжести и ближайшими геодезическими высотами всех пунктов ГДП в критерии

Время		Март – сентябрь	Март 2020 – апрель	Сентябрь 2020 – апрель
ID/PPC	ID/PG	2020	2021	2021
PPC7	PG13	0,8	0,8	0,8
PPC8	PG14	0,8	0,8	0,8
PPC0	PG09	0,8	0,8	0,8
PPC11	PG08	0,8	0,8	0,8
PPC13	PG20	0,8	0,8	0,8

## 4.5.1 Методика учета ВСТ в исходный пункт ГДП

Первым предлагаемым способ является учет вариаций гравитационного поля и гидрогеологической ситуации в исходный репер, применяемый при уравнивании. Нормативные документы [12, 57, 69] и др. рекомендуют определять вертикальные перемещения относительно одного исходного репера.

Рассмотрим экспериментальный полигон (см. рисунок 4.9), рядом с реперами которого расположены пьезометрические скважины. Линии нивелирования между этими реперами уже применялись для оценки поправки в превышение за изменение гравитационного поля.

Обозначим высоты реперов, полученных при минимальном уровне грунтовых вод за  $H_{in}$ , тогда высоты при максимальном уровне грунтовых вод за  $H_{kn}$ .

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 общий случай

$$\Delta H_{ik(n+1)} = H_{k(n+1)} - H_{i(n+1)}, \quad (4.16)$$

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

Тогда условные уравнения связи

$$\begin{aligned} \Delta H_{ik1} &= 0; \\ \Delta H_{ikn} &= \mu_{ikn} + \eta_{ikn} + \xi_{ikn}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

где  $\mu_{ikn}$  – комплекс ошибок геометрического нивелирования  $n$ -го репера;

$\Delta H_{ik1}$  – разность высот исходного репера;

$\eta_{ikn}$  – сезонное колебание высот  $n$ -го репера;

$\xi_{ikn}$  – влияние ВСТ на результаты геометрического нивелирования  $n$ -ого репера.

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

$$DEF_{ikn}(\text{упр}) = [\mu_{ikn} + \eta_{ikn} + \xi_{ikn}]. \quad (4.18)$$

Для  $v_{ikn}$  по результатам экспериментальных данных применим средний показатель случайной ошибки на 1 км хода. Часто бывает, что количество станций нивелирования между соседними циклами нивелирования идентичного хода или полигона расходятся. В связи с этим, нас интересует количественная разница комплекса ошибок.

Для ошибки влияния ВСТ на результаты геометрического нивелирования воспользуемся результатами исследования, полученные в 4.2. Тогда полученные уравнения невязок будут

$$\begin{aligned} W_1 &= \Delta H_{ik1} + DEF_{ik1}(\text{упр}), \\ W_2 &= \Delta H_{ik2} + DEF_{ik2}(\text{упр}), \\ W_3 &= \Delta H_{ik3} + DEF_{ik3}(\text{упр}), \\ W_n &= \Delta H_{ikn} + DEF_{ikn}(\text{упр}), \end{aligned} \quad (4.19)$$

где  $W_1, W_2, W_3, W_n$  – невязки как разность между высотами второго, третьего и n-го реперов.

Далее выполняется переход к условным уравнениям поправок и их решение при условии  $[DEF_{ikn}(\text{упр})]^2 = \min$ .

Фактически это условие  $[P * DEF_{ikn}(\text{упр})]^2$ .

Для дальнейшей реализации учета ВСТ распишем подробно дополнительный критерий влияния гидрогеологической и геофизической составляющей на пункты ГДП.

Для этого воспользуемся функцией

$$\Phi(\Delta G, \Delta F) = \frac{\Delta F_{ik}}{\Delta H_{гrik}}, \quad (4.20)$$

где  $\Delta F_{ik}$  – разность силы тяжести i пункта в k цикле;

$\Delta H_{гр\ i\ k}$  – разность уровня грунтовых вод тяжести  $i$  пункта в  $k$  цикле.

Тогда, не учитывая коррелированность между гидрогеологическими и геофизическими параметрами, получим

$$m_{\Phi} = \frac{1}{\Delta H_{гр\ i\ k\ n}} \sqrt{m_{\Delta F_{i\ k\ n}}^2 + \frac{m_{\Delta H_{гр\ i\ k\ n}}^2 + \Delta F_{i\ k\ n}^2}{\Delta H_{гр\ i\ k\ n}^2}}, \quad (4.21)$$

где  $m_{\Delta H_{гр\ i\ k\ n}}$  – СКП разности уровня грунтовых вод  $n$  пункта в  $i$  и  $k$  цикле. Согласно методическим указаниям по организации и проведению наблюдений подземных вод, ошибка определения разностей составляет 10 % или  $0.1 \cdot \Delta H_{гр\ i\ k}$ ;

$m_{\Delta F_{i\ k\ n}}$  – СКП вариации силы  $n$  пункта в  $i$  и  $k$  цикле, получено экспериментально ранее и равно 12 МкГал (используя отклонение от среднего).

Значения самой функции  $\Phi(\Delta ГР, \Delta F)$  для пунктов экспериментального полигона с учетом расстояния представлены в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Значения функции  $\Phi(\Delta ГР, \Delta F)$  для пунктов экспериментального полигона в разные сезоны наблюдений без учета корреляции

№ пункта	Март – сентябрь 2020	Сентябрь 2020 – апрель 2021
PG09	7,20	5,44
PG10	5,49	11,05
PG11	9,37	15,39
PG16	7,97	7,77
PG2	12,16	15,05
Среднее	8,44	10,94

В качестве примера вычислим СКП функции  $\Phi(\Delta ГР, \Delta F)$  на пункте PG11 на промежуток максимума и минимума уровня грунтовых вод.

Применяя данные таблицы 4.15 и 4.23.  $m_{\Phi}$  для пункта PG11 при максимальном и минимальном уровне грунтовых вод,  $m_{\Phi}$  будет составлять

$$m_{\Phi} = 2,33 \text{ мкГал/1 м гр. вод.} \quad (4.22)$$

Значения СКП функции  $\Phi(\Delta ГР, \Delta F)$  для всех пунктов экспериментального полигона представлены в таблице 4.24.

Таблица 4.24 – Значения СКП функции  $\Phi$  ( $\Delta G P, \Delta F$ ) для пунктов экспериментального полигона в разные сезоны наблюдений без учета корреляции

№ пункта	Март – сентябрь 2020	Сентябрь 2020 – апрель 2021
PG09	1,98	1,81
PG10	3,20	2,99
PG11	2,33	2,63
PG16	2,48	2,14
PG2	2,04	2,13
Среднее	2,41	2,34

Как видно из таблиц 4.23 и 4.24, не представлены данные функции  $\Phi$  ( $\Delta G P, \Delta F$ ) в одинаковые сезоны года. Этому есть несколько причин:

- методика направлена на устранение влияния именно разносезонных наблюдений при максимуме и минимуме уровня грунтовых вод;
- погрешности наблюдений в одинаковый сезон получаются в результате достаточно большой СКП самих наблюдений (что гравиметрических, что пьезометрических) и сильным влиянием самих  $\Delta H_{гpик} < 1$  м.

В случае корреляционной зависимости формула (4.22) примет вид

$$m_{\Phi} = \frac{1}{\Delta H_{гpикn}} \sqrt{m_{\Delta F_{икn}}^2 + \frac{m_{\Delta H_{гpикn}}^2 + \Delta F_{икn}^2}{\Delta H_{гpикn}^2} - 2K_{\Delta F_{икn} - \Delta H_{гpикn}} \frac{\Delta F_{икn}}{\Delta H_{гpикn}}} \cdot m_{\Delta F_{ик}} \cdot m_{\Delta H_{гpик}}, \quad (4.23)$$

Учитывая данные таблицы 4.24

$$m_{\Phi} = \frac{1}{\Delta H_{гpикn}} \sqrt{m_{\Delta F_{икn}}^2 + \frac{m_{\Delta H_{гpикn}}^2 + \Delta F_{икn}^2}{\Delta H_{гpикn}^2} - 1.86 \frac{\Delta F_{ик} \cdot m_{\Delta F_{икn}} \cdot m_{\Delta H_{гpикn}}}{\Delta H_{гpикn}}}. \quad (4.24)$$

Тогда  $m_{\Phi}$  для пункта PG11 при максимальном и минимальном уровне грунтовых вод с учетом корреляционной связи, применяя формулу (4.24), будет составлять

$$m_{\Phi} = 2,35 \text{ мкГал/1 м гр. вод.} \quad (4.25)$$

Значения функции  $\Phi (\Delta GP, \Delta F)$  для всех пунктов экспериментального полигона с учетом корреляции представлены в таблице 4.25.

Таблица 4.25 – Значения СКП функции  $\Phi (\Delta GP, \Delta F)$  для пунктов экспериментального полигона в разные сезоны наблюдений с учетом корреляции

№ пункта	Март – сентябрь 2020	Сентябрь 2020 – апрель 2021
PG09	2,01	1,79
PG10	3,21	2,98
PG11	2,35	2,60
PG16	2,49	2,12
PG2	2,08	2,07
Среднее	2,43	2,31

Окончательная функция, которая будет применяться при уравнивании и учете геотехнических параметров в исходный пункт ГДП

$$T (\Delta H, \Delta GP, \Delta F) = \frac{\Delta H_{ikn}}{\Phi_{ikn}}, \quad (4.26)$$

где  $\Delta H_{ikn}$  – разность высоты  $n$  пункта в  $i$  и  $k$  цикле;

$\Phi_{ikn}$  – разность отношений силы тяжести и уровня грунтовых вод  $n$  пункта в  $i$  и  $k$  цикле.

Тогда, не учитывая коррелированность между геотехническими параметрами,

$$m_T = \frac{1}{\Phi_{ikn}} \sqrt{m_{\Delta H_{ikn}}^2 + \frac{\Delta H_{ikn}^2}{\Phi_{ikn}^2} \cdot m_{\Phi_{ikn}}^2}, \quad (4.27)$$

где  $m_{\Delta H_{ikn}} = k \cdot \Delta n$ ,  $\Delta n$  – разность количества станций при получении высоты пункта ГДП;

$k$  – СКП на станции нивелирования на 1 км хода. Значение получено по экспериментальным данным;

$m_{\Phi_{ikn}}$  – СКП функции  $\Phi (\Delta GP, \Delta F)$ ;

$\Phi (\Delta GP, \Delta F)$  – отношение разности уровня грунтовых вод и силы тяжести на пункте ГДП.

Для пункта PG11  $m_T$  при максимальном и минимальном уровне грунтовых вод, применяя формулу (4.27) без учета корреляционной зависимости, будет составлять

$$m_T = 0,08 \frac{\text{мм}}{\left(\frac{\text{мкГал}}{1 \text{ м гр. вод}}\right)}. \quad (4.28)$$

Значения функции  $T(\Delta H, \Delta GP, \Delta F)$  для всех пунктов экспериментального полигона представлены в таблице 4.26.

Таблица 4.26 – Значения СКП функции  $T(\Delta H, \Delta GP, \Delta F)$  для пунктов экспериментального полигона в разные сезоны наблюдений без учета корреляции

№ пункта	Март – сентябрь 2020	Сентябрь 2020 – апрель 2021
PG09	0,38	0,71
PG10	0,18	0,05
PG11	0,17	0,08
PG16	0,25	0,25
PG2	0,02	0,03
Среднее	0,20	0,22

В случае корреляционной зависимости формула (4.27) примет вид

$$m_T = \frac{1}{\Phi_{ikn}} \sqrt{m_{\Delta H_{ikn}}^2 + \frac{m_{\Phi_{ikn}}^2 + \Delta H_{ikn}^2}{\Phi_{ikn}^2} + 2 \cdot (-0.5) \cdot \frac{\Delta H_{ikn} \cdot m_{\Delta H_{ikn}} \cdot m_{\Phi_{ikn}}}{\Phi_{ikn}}}. \quad (4.29)$$

Значения функции  $T(\Delta H, \Delta GP, \Delta F)$  для всех пунктов экспериментального полигона с учетом корреляционной зависимости представлены в таблице 4.27.

Таблица 4.27 – Значения СКП функции  $T(\Delta H, \Delta GP, \Delta F)$  для пунктов экспериментального полигона в разные сезоны наблюдений с учетом корреляции

№ пункта	Март – сентябрь 2020	Сентябрь 2020 – апрель 2021
PG09	0,39	0,69
PG10	0,18	0,05
PG11	0,19	0,09
PG16	0,31	0,31
PG2	0,02	0,04
Среднее	0,22	0,24

Тогда  $m_T$  для пункта PG11 при максимальном и минимальном уровне грунтовых вод с учетом корреляционной связи, применяя формулу (4.29), будет составлять

$$m_T = 0,09 \frac{\text{мм}}{\left(\frac{\text{мкГал}}{1 \text{ м гр. вод}}\right)}. \quad (4.30)$$

Анализируя таблицу 4.27, получаем следующее:

- аналогично функции  $\Phi(\Delta GP, \Delta F)$ , функция  $T(\Delta H, \Delta GP, \Delta F)$  направлена на устранение погрешностей разносезонных наблюдений;
- в случае, если функция  $T(\Delta H, \Delta GP, \Delta F)$  стремится к  $-\infty$  для какого-то пункта ГДП, нет необходимости в устранении погрешностей;
- подобные погрешности получаются в результате двух состояний переменных – либо разность межцикловая стремится к нулю, либо отношение функции  $\Phi(\Delta GP, \Delta F)$  стремится к  $+\infty$ .

В результате, для корректировки разносезонных наблюдений, внесем коррекции в исходный пункт. Тогда невязка в экспериментальном полигоне (см. рисунок 4.4) будет представлена в таблице 4.28.

Таблица 4.28 – 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
$\Sigma$	25,0	30,2
СКП	5,6	6,5

После внесения коррекций, с применением функции  $T(\Delta H, \Delta GP, \Delta F)$ , получим таблицу 4.29.

Таблица 4.29 – 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
$\Sigma$	12,4	26,3
СКП	2,4	5,6

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

#### 4.5.2 Апробация метода с помощью ГНСС-технологий

Если предыдущий метод представляет из себя в некоторой степени усреднение разностных результатов, то почти идеальную картину возможно получить при применении геодезических высот. Для этого сначала рассмотрим экспериментальные данные и технологию спутникового нивелирования.

Существенный вклад по совершенствованию технологии спутникового нивелирования внесли Остроумов Л. В., Кравчук И. М.

Исследования СДЗП и комплексный геодинамический мониторинг с применением спутниковых технологий приведены в работах Кутушева Шайхила-Ислам Бургановича [33] и Марковича К. И. [36].

Остроумов Л. В. в своем научном труде [51] с помощью спутниковых технологий определил геодезические высоты с точностью 1-2 см.

Научная работа Кравчука И. М. [32] посвящена спутниковому нивелированию и оценке точности полученных геодезических и нормальных высот.

В целом, можно утверждать, что спутниковое нивелирование при соблюдении целого ряда условий позволяет получить точность IV класса (20 мм на 1 км) и в редких случаях III класса (10 мм на 1 км).

В результате выполненных спутниковых 8 часовых наблюдений на трех исходных пунктах принудительного центрирования (ППЦ) были получены координаты и высоты методом Precise Point Positioning (PPP), обработанные в одном из сервисов (CSRS-PPP Magic GNSS Trimble RTX, GrafNet).

Исследования ученых США и ЦНИИГАиК продемонстрировали, что точность спутниковых наблюдений в большей степени зависит от продолжительности наблюдений, а не расстояний векторов [63, 89].

Схема расположения трех исходных пунктов ППЦ относительно УС представлена на рисунке 4.10.

Работы [37, 77, 79] посвящены исследованиям использования метода PPP. Полученная точность позволяет использовать метод для геодинамических исследований.

Диссертационная работа Устинова А. В. доказала эффективность и точность метода PPP на Загорской ГАЭС-2, получив точность абсолютных координат (с внесением атмосферных поправок) 2 мм в плане и 5 мм по высоте [80].

Статьи [29, 90, 95, 96] посвящены влиянию атмосферных нагрузок на результаты PPP. Исследования Калинникова В. В. выявили деформации земной коры порядка 5 мм.

Исследование продемонстрировало, что спутниковые наблюдения зависимы от изменений уровня грунтовых вод (см. рисунок 4.8) и показывают изменения в положении пунктов от сезонности (таблица 4.30).

Данные результаты в целом совпадают с зарубежными исследованиями сезонных изменений GPS наблюдений, охватывающих 25-летние наблюдения стационарных станций [94, 97, 103], которые продемонстрировали изменение скоростей высот в разные сезоны года, из-за приливов, атмосферных и гидрологических нагрузок, а также методы компенсации этих колебаний. Особенно это актуально при обработке мониторинговых сезонных наблюдений вертикальных перемещений земной поверхности.

Доказательство коррелированности геодезической высоты и силы тяжести было представлено в таблице 4.22.

Таблица 4.30 – Колебания географических координат и геодезических высот на пунктах исследования

Месяц и год наблюдений	PPC3 $\delta B, \text{мм}$ $\delta L, \text{мм}$ $\delta H, \text{мм}$	PPC4 $\delta B, \text{мм}$ $\delta L, \text{мм}$ $\delta H, \text{мм}$	PPC0 $\delta B, \text{мм}$ $\delta L, \text{мм}$ $\delta H, \text{мм}$
Март 2020	6	25	21
	52	42	98
	-4	-26	-113
Сентябрь 2020	23	29	12
	29	5	83
	48	-11	104
Апрель 2021	48	25	28
	11	42	-77
	18	-26	-3
Общее движение, мм/год	32	29	28
	52	41	57
	1	-4	-6

Графическое представление полученных разностей географических координат и геодезических высот представлено на рисунках 4.11–4.13

Пункт РРС0 находится в непосредственной близости к РГ09 вблизи реки, в отличие от пунктов РРС3 и РРС4, которые находятся вне критерия влияния силы тяжести, что и подтверждается небольшими изменениями силы тяжести (не более 35 мкГал при минимуме и максимуме уровня грунтовых вод) и слабыми межцикловыми изменениями уравненных нормальных высот (не более 2 мм). Разность географических координат и геодезических высот при минимуме и максимуме уровня грунтовых вод представлены в таблице 4.31.

Таблица 4.31 – Разность географических координат и геодезических высот между сентябрем 2020 г. и апрелем 2021 г.

№ пункта	dB,мм	dL,мм	dH,мм
РРС0	55	22	-116
РРС3	59	69	34
РРС4	35	43	14

Аномальные изменения фиксируются на пункте, расположенном непосредственно у реки – РРС0, при этом в нескольких циклах.

Разность силы тяжести на ближайших гравиметрических пунктах составляет при интерполировании на пункты РРС составляет представлена в таблице 4.32.

Таблица 4.32 – Сравнение силы тяжести на пунктах вблизи РРС в сентябре 2020 г. и апреле 2021 г.

Разности силы тяжести, мкГал	
№ пункта	δg
РРС0	-38
РРС3	2
РРС4	10

Что касается пункта РРС0, на нем не были выявлены какие-либо повреждения с 2019 по 2021 г.

Многочисленные мониторинговые наблюдения на этом пункте выявили расхождения высот от сезона наблюдений. Это касается и геодезических, и нормальных высот.

При этом при сравнении геодезической высоты РРС0 в одинаковые сезоны года (апрель 2019 г., апрель 2020 г. и апрель 2021 г.) изменения укладываются в точность самого метода PPP (таблица 4.33).

Смещение Индостанской плиты приведено на рисунке 4.16 и не превышает 4 см в плане и 2 см по высоте.

Таблица 4.33 – Изменение геодезической высоты на пункте РРС0

№ пункта	Разность геодезических высот, мм	
	2020 – 2019 dH, мм	2021 - 2020 dH, мм
РРС0	-9	-3



Рисунок 4.10 – Схема выполненных наблюдений на исходных пунктах ППЦ на площадке строительства УС

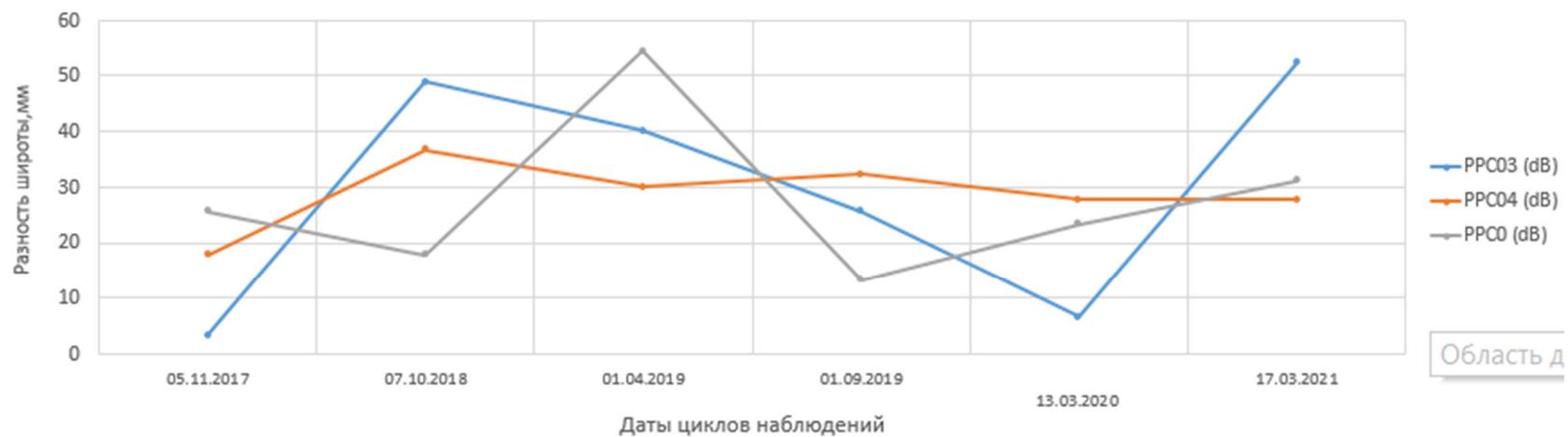


Рисунок 4.11 – Графики изменения широты с 2017 по 2021 г. на исходных пунктах ППЦ

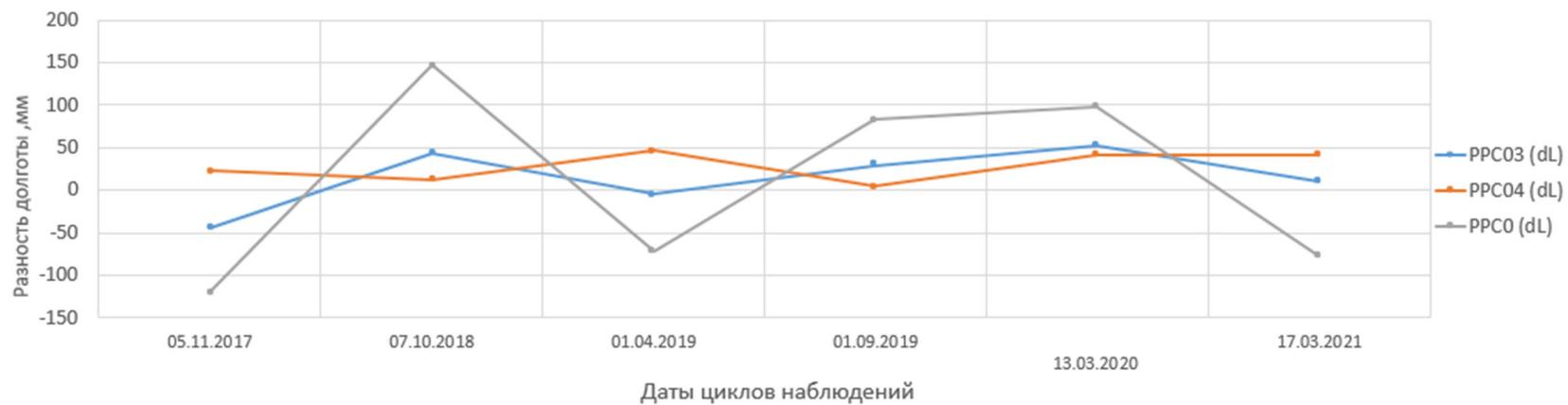


Рисунок 4.12 – Графики изменения долготы с 2017 по 2021 г. на исходных пунктах ППЦ

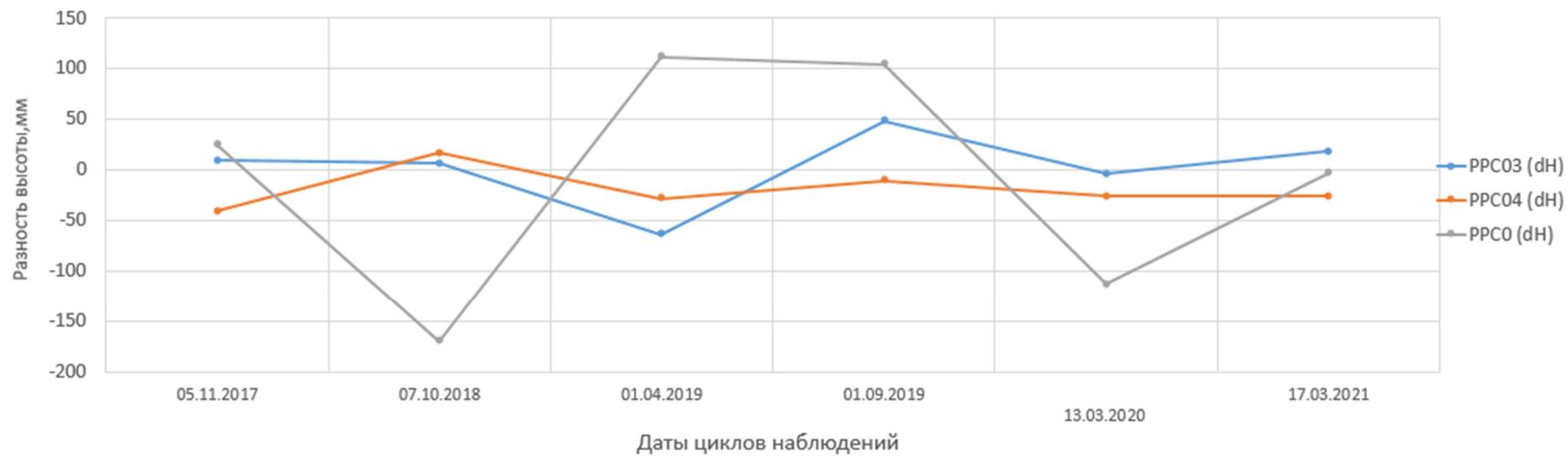


Рисунок 4.13 – Графики изменения геодезической высоты с 2017 по 2021 г. на исходных пунктах ППЦ

При этом сравнение геодезических высот в одинаковые сезоны года демонстрирует стабильность геодезической высоты при сравнении результатов, выполненных в разные сезоны года.

Выполнив комплексную оценку изменений на исходном пункте РРС0, получим следующее.

1 Полиномиальное уравнение учета изменений силы тяжести от изменения уровня грунтовых вод (рисунок 4.14).

2 Аномальное изменение геодезической высоты при сравнении наблюдений при максимальном и минимальном уровне грунтовых вод (рисунок 4.15).

По вышеизложенным данным была построена модель изменения геодезической высоты пункта РРС0 с добавлением промежуточного цикла в сентябре 2020 г.

В результате были получены полиномиальные уравнения изменения геодезической высоты и измеренного превышения пункта РРС0 от вариаций силы тяжести (см. рисунок 4.15). Изменение силы тяжести и геодезической высоты претерпевает одинаковые амплитудные скачки.

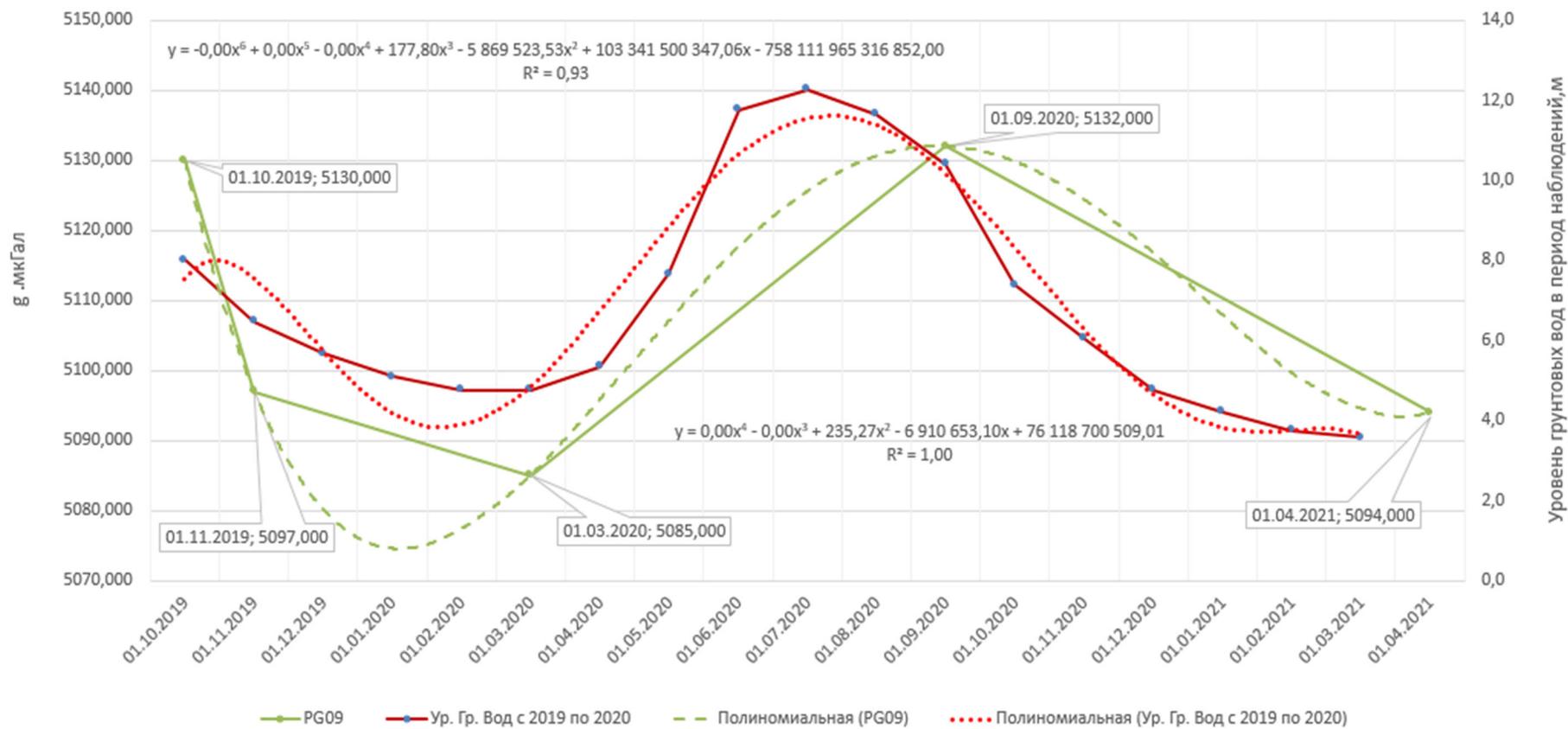


Рисунок 4.14 – Аппроксимирующая модель изменения силы тяжести и уровня грунтовых вод

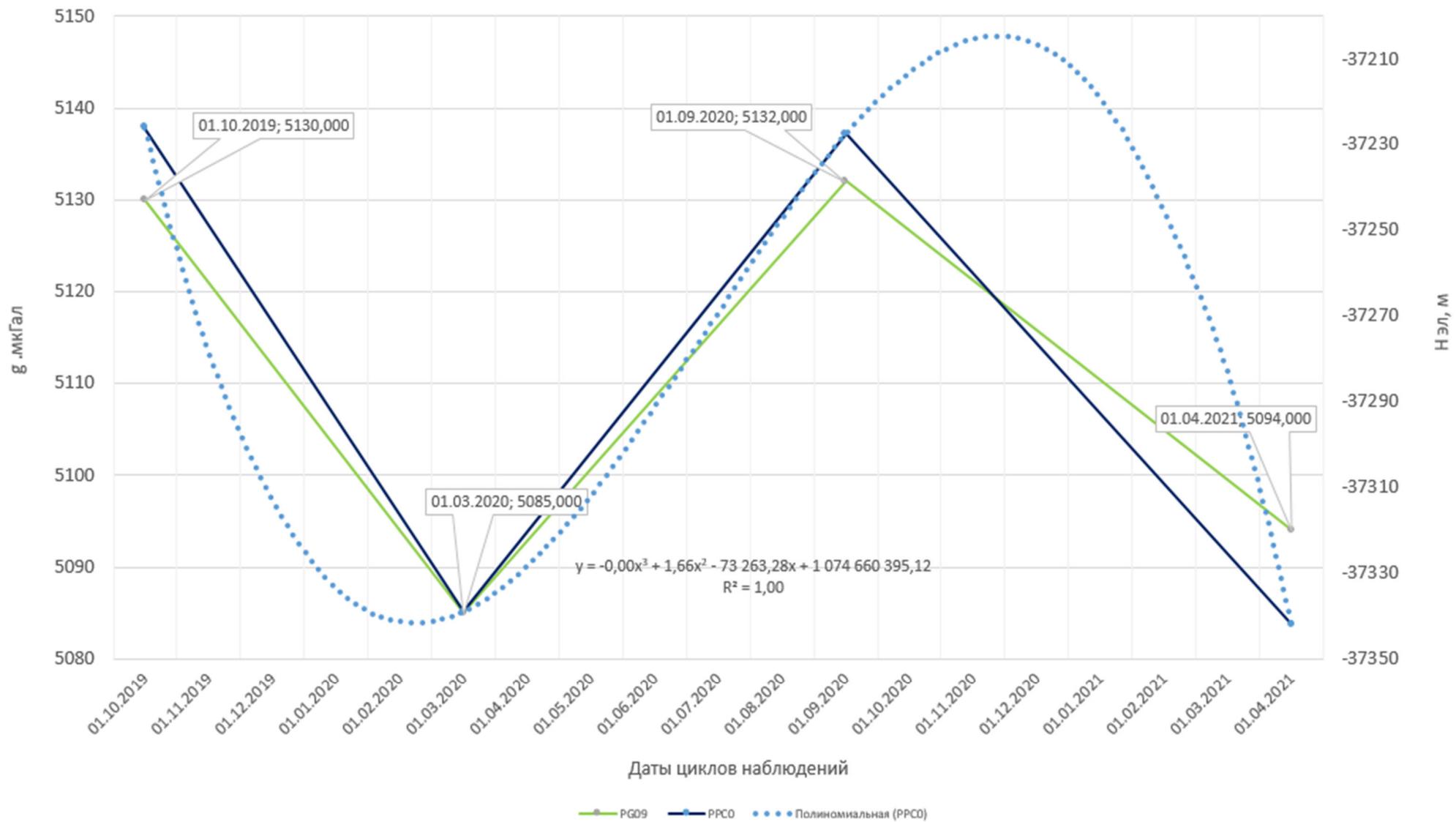


Рисунок 4.15 – Аппроксимирующая модель изменения геодезической высоты от ВСТ

Исследования Герасимова Г. Н. [87] также доказывают сезонные вариации спутниковых наблюдений от нескольких миллиметров до 1,5 см. Однако вопрос о природе таких вариаций до сих пор остается открытым.

В качестве независимого доказательства перспективности способа учета сезонности изменения геодезических высот на исходном пункте ГДП были использованы результаты со станций ITRF вблизи места исследования.

Все объекты исследования (площадка УС и два пункта ITRF) расположены на Индостанской плите.

Данные по пунктам DHAК и BRN2 взяты с официального сайта <https://itrf.ign.fr/en/homepage> [90].

Скорости (м/год) данных пунктов сопоставимы и представлены на рисунке 4.16.

DOMES	ID	PT	PARAMETER	TYPE	VALID_FROM	VALID_UNTIL	UNIT	VALUE	SIGMA
24601M001	DHAК	A	X position at t0 = 15:001:00000		00:000:00000	00:000:00000	m	-4.09141408814000e+04	9.98146e-04
24601M001	DHAК	A	Y position at t0 = 15:001:00000		00:000:00000	00:000:00000	m	5.84202071536727e+06	2.56487e-03
24601M001	DHAК	A	Z position at t0 = 15:001:00000		00:000:00000	00:000:00000	m	2.55058724739954e+06	1.40221e-03
24601M001	DHAК	A	X velocity		00:000:00000	00:000:00000	m/y	-4.04108051109466e-02	9.40641e-05
24601M001	DHAК	A	Y velocity		00:000:00000	00:000:00000	m/y	-2.61438152273451e-02	2.97979e-04
24601M001	DHAК	A	Z velocity		00:000:00000	00:000:00000	m/y	2.74227961829200e-02	1.52962e-04
21504M001	BRN2	A	X position at t0 = 15:001:00000		00:000:00000	12:102:31117	m	2.71787185164370e+05	9.96189e-04
21504M001	BRN2	A	Y position at t0 = 15:001:00000		00:000:00000	12:102:31117	m	5.70439354673866e+06	2.51865e-03
21504M001	BRN2	A	Z position at t0 = 15:001:00000		00:000:00000	12:102:31117	m	2.83070826132058e+06	1.47031e-03
21504M001	BRN2	A	X velocity		00:000:00000	12:102:31117	m/y	-3.96450895951562e-02	1.51537e-04
21504M001	BRN2	A	Y velocity		00:000:00000	12:102:31117	m/y	-1.45400473182790e-02	5.11599e-04
21504M001	BRN2	A	Z velocity		00:000:00000	12:102:31117	m/y	3.00904230711396e-02	2.73121e-04
21504M001	BRN2	A	X position at t0 = 15:001:00000		12:102:31117	15:115:22286	m	2.71787182281498e+05	8.20274e-04
21504M001	BRN2	A	Y position at t0 = 15:001:00000		12:102:31117	15:115:22286	m	5.70439354831778e+06	1.48729e-03
21504M001	BRN2	A	Z position at t0 = 15:001:00000		12:102:31117	15:115:22286	m	2.83070825602194e+06	9.98308e-04
21504M001	BRN2	A	X velocity		12:102:31117	15:115:22286	m/y	-3.96450895951562e-02	1.51537e-04
21504M001	BRN2	A	Y velocity		12:102:31117	15:115:22286	m/y	-1.45400466158067e-02	5.11598e-04
21504M001	BRN2	A	Z velocity		12:102:31117	15:115:22286	m/y	3.00904206194049e-02	2.73120e-04
21504M001	BRN2	A	X position at t0 = 15:001:00000		15:115:22286	00:000:00000	m	2.71787179500204e+05	8.71000e-04
21504M001	BRN2	A	Y position at t0 = 15:001:00000		15:115:22286	00:000:00000	m	5.70439354671888e+06	1.82388e-03
21504M001	BRN2	A	Z position at t0 = 15:001:00000		15:115:22286	00:000:00000	m	2.83070825404331e+06	1.13864e-03
21504M001	BRN2	A	X velocity		15:115:22286	00:000:00000	m/y	-3.96450895951562e-02	1.51537e-04
21504M001	BRN2	A	Y velocity		15:115:22286	00:000:00000	m/y	-1.45400488989707e-02	5.11598e-04
21504M001	BRN2	A	Z velocity		15:115:22286	00:000:00000	m/y	3.00904253787787e-02	2.73119e-04

Рисунок 4.16 – Координаты и скорости пунктов ITRF между площадкой строительства УС

Изменение в пространстве пункта DHAК представлено на рисунках 4.17 и 4.18, для пункта BRN2 данные ограничены 2012 г.

При увеличении масштаба становятся отчетливо видны периодичность изменений геодезических высот пункта ДНАК с минимальной и максимальной амплитудой в апреле и сентябре, что согласовывается с изменением грунтовых вод (см. рисунок 4.8) и стремится к графику среднемесячных осадков для г. Дакка (рисунок 4.19).

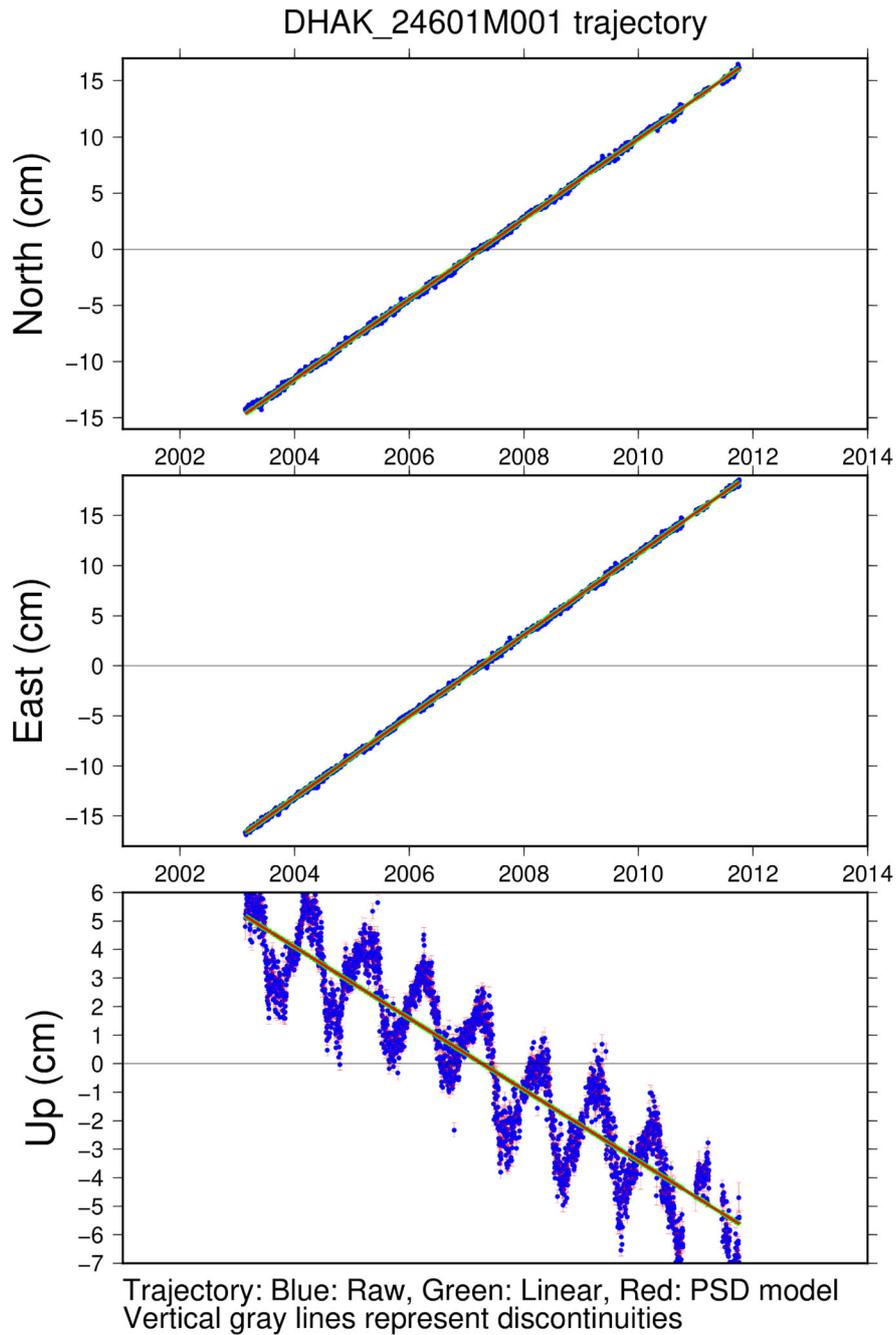


Рисунок 4.17 – Траектория пространственного положения пункта ITRF ДНАК

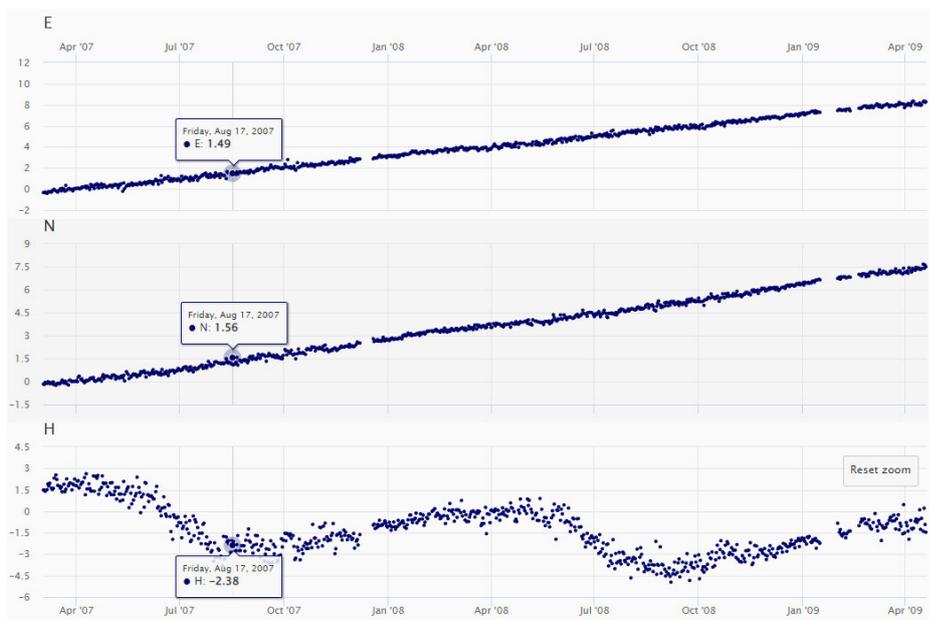


Рисунок 4.18 – Детальная траектория пространственного положения пункта ITRF ДНАК

Удаленность между площадкой УС и пунктом ITRF ДНАК составит порядка 130 км.

Другая ситуация наблюдается с пунктом BRN2, расположенным в г. Биратнагар в Непале. Данные ограничены 2020 г. Город расположен далеко от рек и траектория изменения BRN2 представлена на рисунках 4.20 и 4.21.

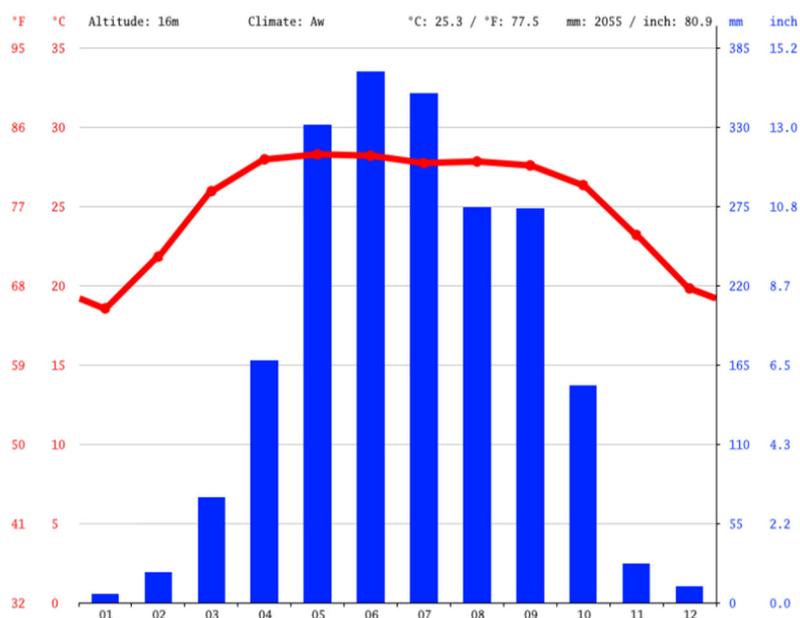


Рисунок 4.19 – Среднемесячная сумма осадков для г. Дакка

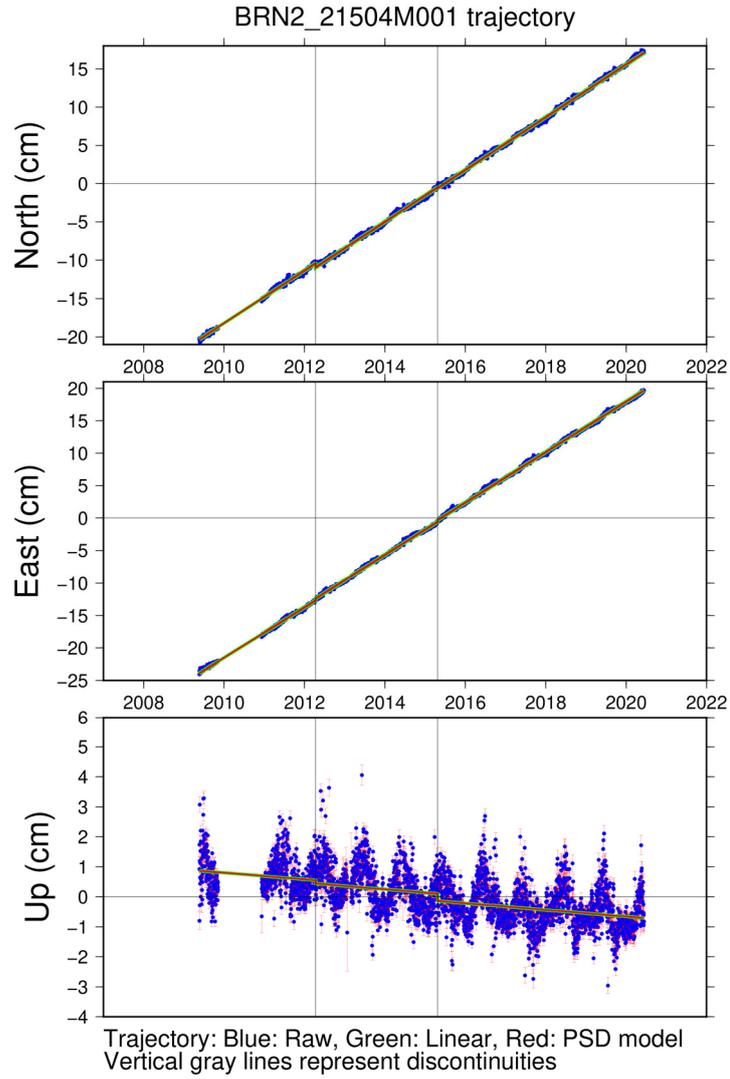


Рисунок 4.20 – Траектория пространственного положения пункта ITRF BRN2



Рисунок 4.21– Детальная траектория изменения положения пункта ITRF BRN2

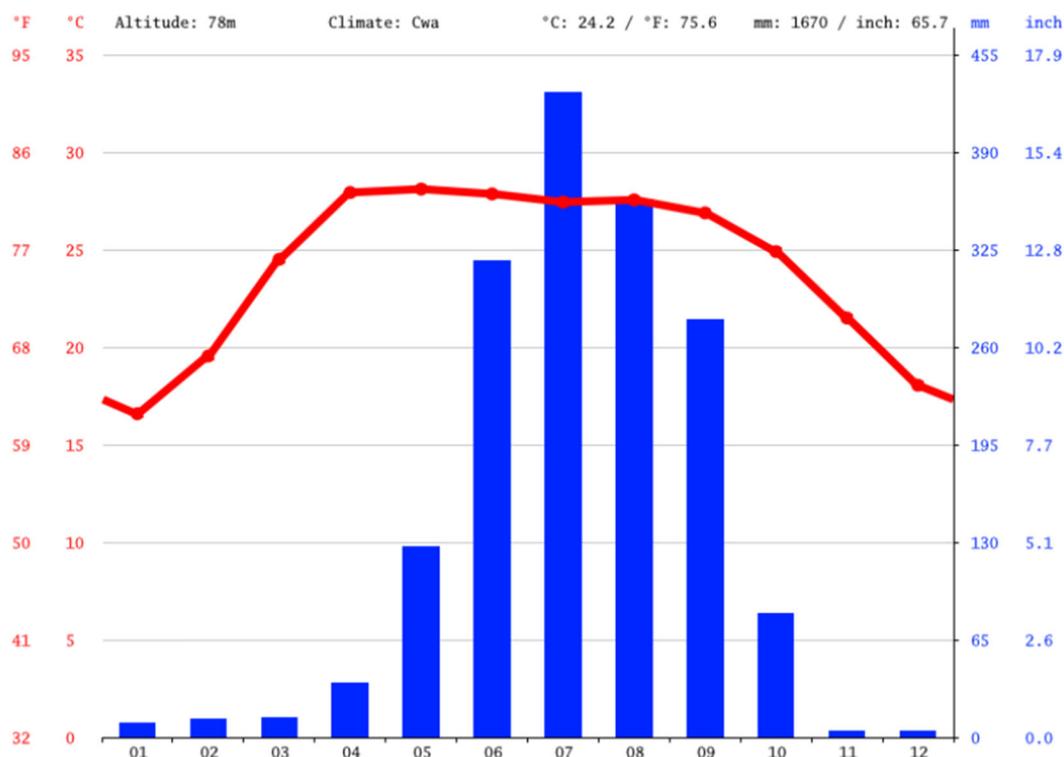


Рисунок 4.22 – Среднемесячная сумма осадков для г. Биратнагар

Как отмечалось в работе Устинова А. В., атмосферные нагрузки приводят к изменениям геодезических высот порядка 5 мм. При движении литосферных плит порядка 4 см полугодоевое смещение составит 20 мм.

В итоге, если из искомой разности геодезических высот вычесть факторы, вызывающие их изменения, мы получим влияние уровня грунтовых вод на результаты спутниковых наблюдений.

Предлагается следующая технология апробации методики учета сезонных ВСТ и оценки СДЗП с помощью спутниковых технологий.

1 Проведение первого цикла наблюдений на ГДП геометрическим нивелированием I класса в межсезонье, получение исходных высот.

2 Разработка конструкции пункта сети ГДП, при которой появляется возможность выполнять одновременные ГНСС-наблюдения и высокоточное геометрическое нивелирование (конструкция пунктов ППЦ на данный момент предполагает либо ГНСС-наблюдения, либо геометрическое нивелирование).

3 Один из пунктов ГДП должен быть исходным. Данный пункт должен использоваться как базовая станция с непрерывной записью информации и загрузкой

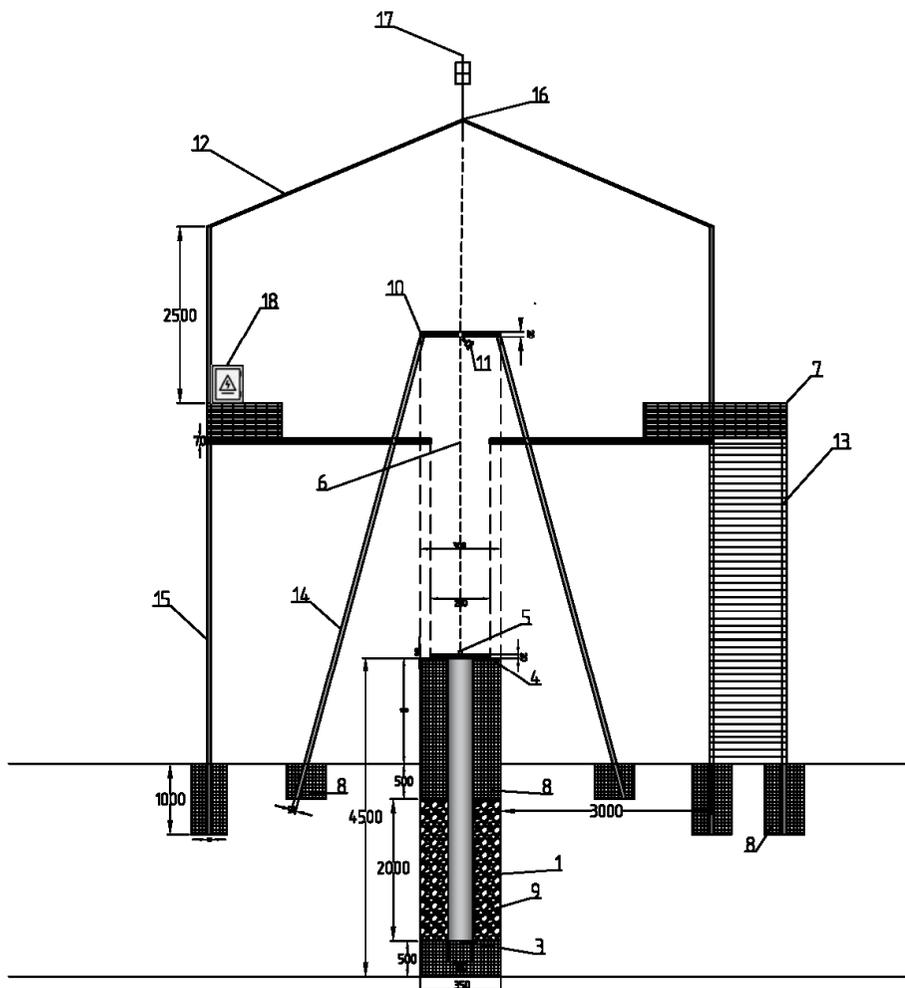
на сервер. Также вблизи должны располагаться скважина и гравиметрический пункт для контроля других геотехнических параметров. Согласно [16] такой пункт будет называться исходным пунктом (ИП). Дополнительно такая конструкция позволит оперативно выполнить оценку деформаций в случае землетрясения. Предлагаемая конструкция пункта представлена на рисунке 4.23.

Согласно требованиям [70] количество исходных пунктов сети при уравнивании спутниковых наблюдений должно быть не менее четырех. В связи с этим для этих пунктов либо должна применяться аналогичная конструкция с базовой станцией (что проблематично, учитывая удаленность таких пунктов от площадок УС и источников электроэнергии), либо можно ограничиться расположением вблизи них скважины и гравиметрического пункта для комплексного контроля. Предлагаемая схема наблюдений представлена на рисунке 4.24.

По результатам годовых наблюдений данные с исходного пункта обрабатываются методом PPP, анализируются его годовые смещения, уровень грунтовых вод и сила тяжести.

Относительно ИП уравнивается четыре пункта, образующих каркасную сеть, и далее опорные и внешние геодезические сети.

Постоянные наблюдения на ИП следует выполнять в течение минимум трех лет, поскольку это минимальный промежуток для оценки и прогнозирования.



- 1 – пластиковая труба, Ø350;
- 2 – металлическая труба, Ø150;
- 3 – якоря бетон, 150 × 150 × 150;
- 4 – диск металлический Ø200, h = 20 мм;
- 5 – винт 5/8" (≈16 мм);
- 6 – отверстие технологическое;
- 7 – забор по периметру, сетка рабица 500 мм;
- 8 – бетон класса В22,5;
- 9 – щебень гравийный;
- 10 – металлический столик, Ø200, h = 20 мм;
- 11 – становой винт 5/8";
- 12 – крыша из материала, пропускающего сигналы ГНСС-систем (тонкий пластик, стекло);
- 13 – лестница металлическая;
- 14 – труба, закрепляющая столик с землей, Ø50, h = 6700 мм;
- 15 – труба Ø70, контур конструкции h = 10000 мм;
- 16 – мачта для визира;
- 17 – визирная цель;
- 18 – электрощиток для питания ГНСС

Рисунок 4.23 – Предлагаемая конструкция исходных пунктов ГДП

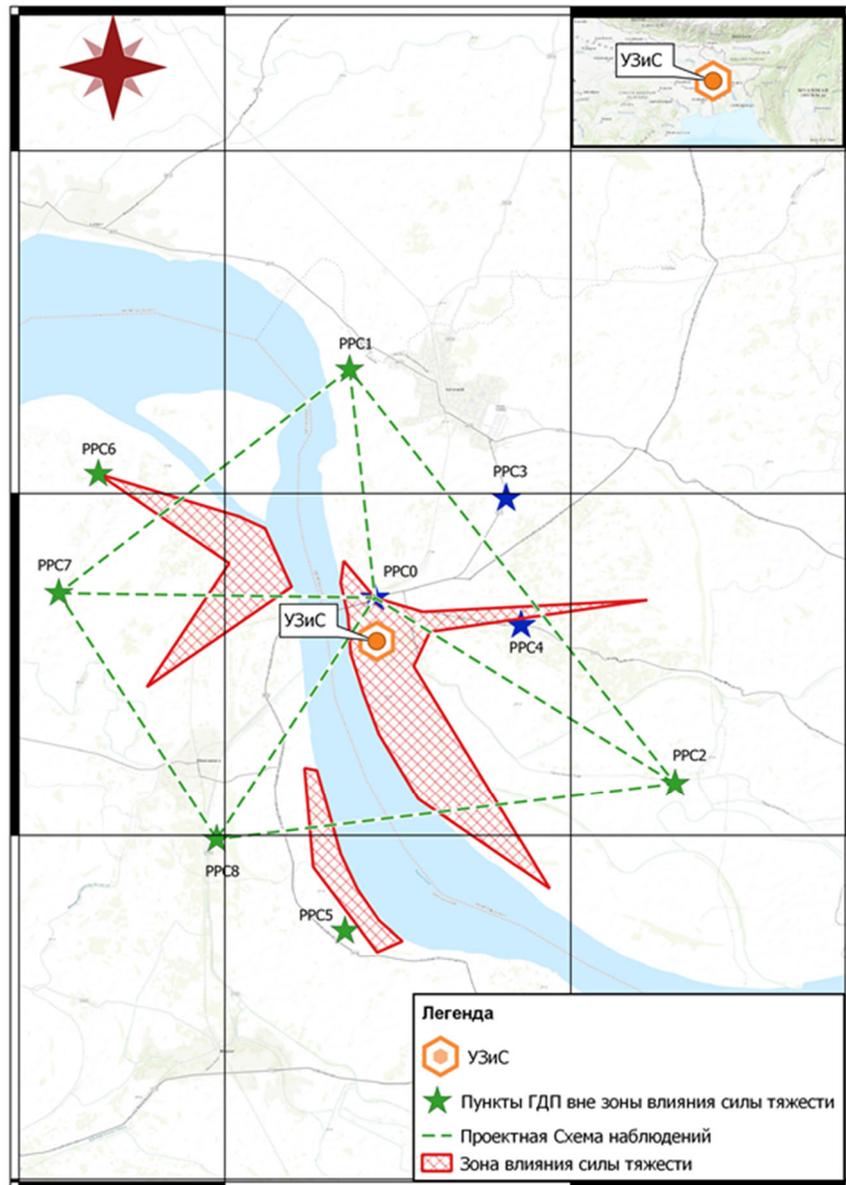


Рисунок 4.24 – Проектная схема относительных спутниковых наблюдений для фиксации СДЗП и сезонных колебаний на площадке строительства УС

Как было сказано ранее в 2.3, деформацию по общей классификации принято разделять на упругую и остаточную.

Для получения упругой деформации, из-за комплексного влияния грунтовых вод – силы тяжести, наблюдения должны выполняться при максимуме и минимуме уровня грунтовых вод.

Остаточная деформация будет получена при выполнении повторных спутниковых наблюдений через равные промежутки времени. До этого будет линейно увеличиваться упругая деформация до достижения максимума при пике уровня грунтовых вод.

Графически упругую, остаточную и общую деформацию по исследуемому пункту ITRF ДНАК можно представить на рисунке 4.25.

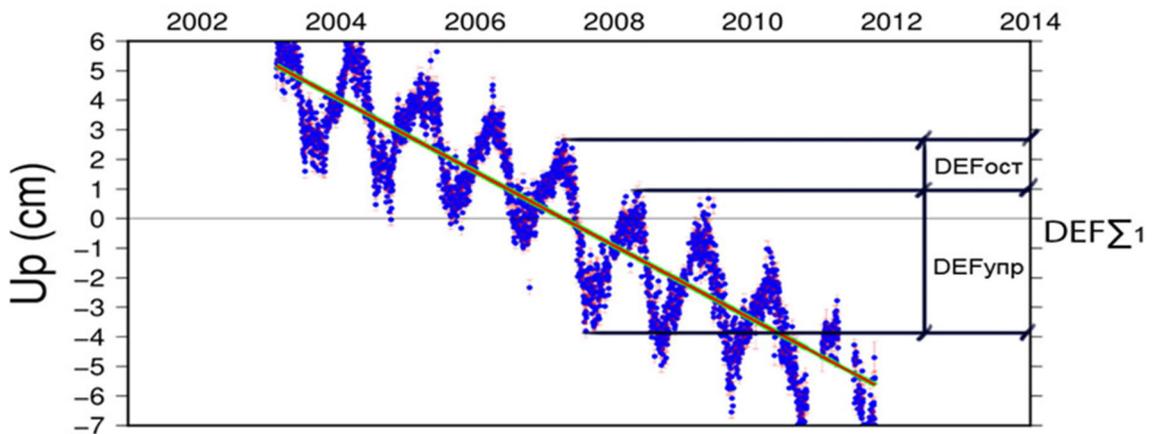


Рисунок 4.25 – Виды деформаций на примере пункта ITRF ДНАК

Тем самым, имея систему непрерывного наблюдения на исходном пункте ГДП, можно перманентно вводить поправки за упругую деформацию и выполнять переуравнивание пунктов ГДП в любой промежуток времени. Если рассмотреть пункт как единое тело одинаковой плотности, то  $DEF_{пл}$  можно найти по формуле [50]

$$DEF_{пл} = k \cdot p, \quad (4.31)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности (постели)  $\text{кН/м}^3$ , зависящий от типа;

$p$  – реактивное давление,  $\text{Н/м}^2$ .

Формула (4.31) представляет из себя модель Винклера – прямая зависимость осадки  $DEF_{пл}$  и реактивного давления.

Модель Винклера является простейшей моделью. Однако на практике, что подтвердили геологические и геофизические изыскания, чаще всего между уровнем грунтовых вод и земной поверхностью находится более одного слоя.

Для улучшения моделирования поведения репера, возможно применение билинейной модели основания Федоровского с переменным коэффициентом постели [93].

Рекомендации по вычислению коэффициента пропорциональности приведены в нормативном документе [72]. В нашем случае воспользуемся коэффициентом 5 000 (между 4 000–6 000) кН/м<sup>3</sup>.

В итоге при сравнении циклов наблюдений с периодом год, по предложенному методу и с конструкцией исходного пункта ГДП будут оставаться только остаточные ( $DEF_{\text{ост}}$ ) и равномерные ( $DEF_{\text{пл}}$ ) деформации.

#### 4.6 Дополнительные факторы, вызывающие изменение гидрогеологической нагрузки на прибрежные пункты ГДП и прогноз

Подземные воды современных и древних речных долин играют большую роль в водоснабжении населенных пунктов и промышленных предприятий.

Режим грунтовых вод тесно связан с режимом рек [7]. В диссертации на основе полученных данных доказана тесная гидравлическая связь между уровнем реки и уровнем подземных вод, река является естественной границей потока и подвержена сезонным колебаниям.

Площадка исследований расположена рядом с меандрирующей рекой, что накладывает свои особенности на получение и оценку результатов.

Согласно [39] грунтовые воды находятся в непрерывном движении и перемещаются под влиянием силы тяжести от участков с более высоким положением уровня грунтовых вод к участкам с менее высоким его положением.

Меандрирующая река рядом с площадкой УС уже была представлена на рисунке 4.26. Данную реку можно отнести, применяя классификацию Государственного гидрологического института (ГГИ) [84], к свободному или незавершенному меандрированию.

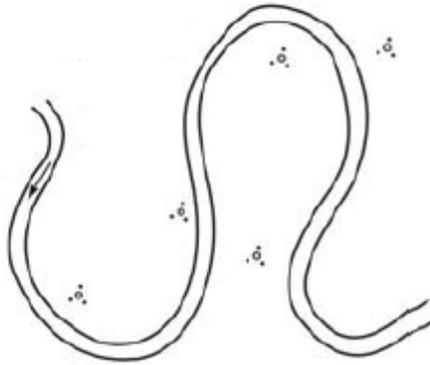


Рисунок 4.26 – Изменение кривизны реки исследуемой реки

При этом морфологические элементы реки согласно [84] представлены на рисунке 4.27.

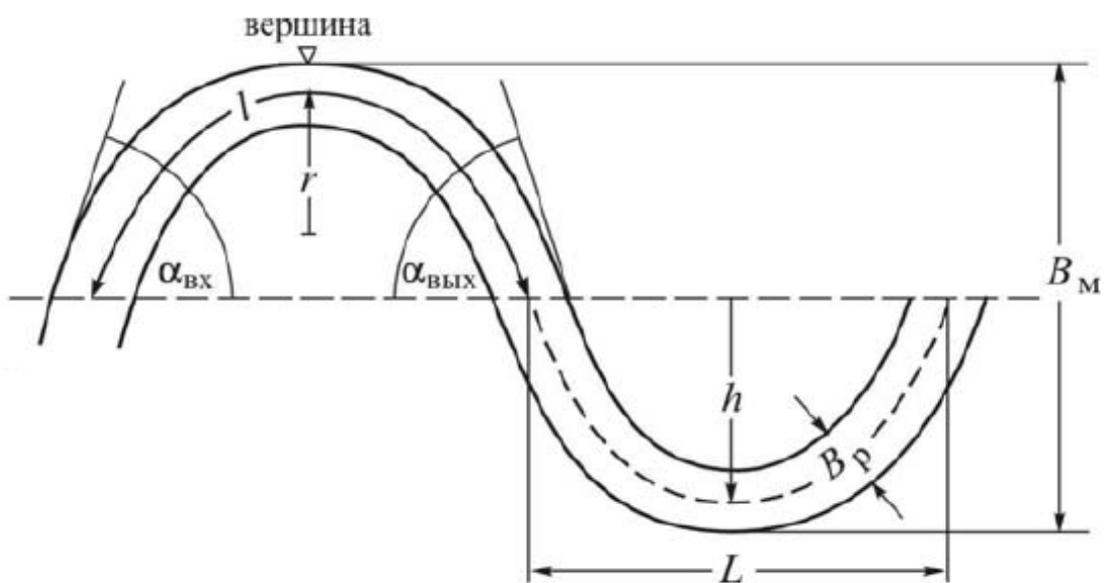
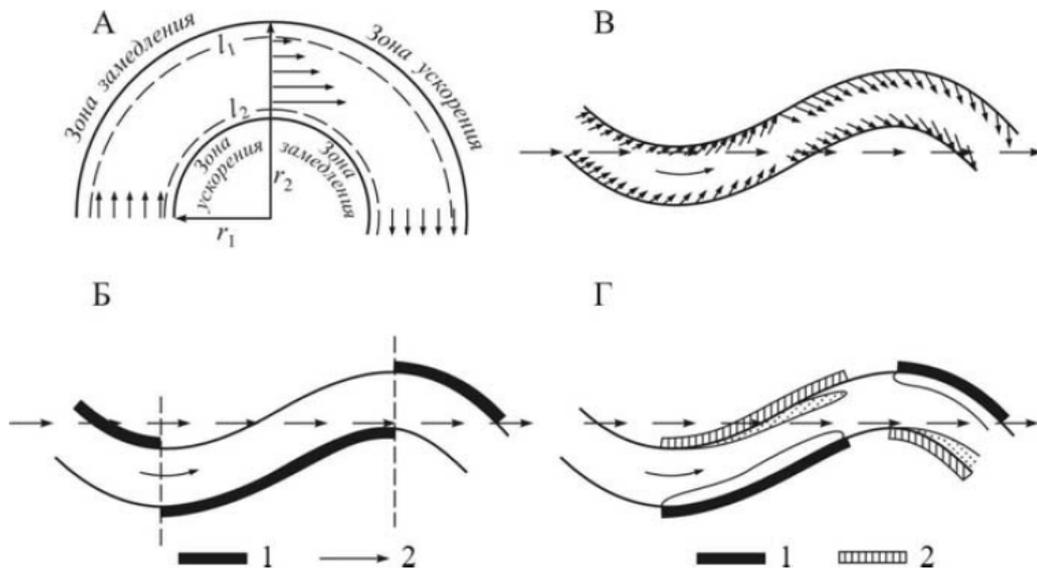


Рисунок 4.27 – Морфологические элементы и параметры сегментных излучин  $B_m$  – пояс руслоформирования  $B_p$ ; стрела прогиба  $h$  – высота излучины  $u_m$ ; шаг излучин обозначается  $\lambda$ ; длина излучин –  $S$ .

Нередко применяются и другие показатели – угол входа  $\alpha_{вх}$ , угол выхода  $\alpha_{вых}$ , угол разворота излучины  $\alpha = \alpha_{вх} + \alpha_{вых}$ , а также угол сопряжения излучин как разность углов выхода верхней излучины (рисунок 4.28) [35].

Согласно полученным данным, можно сказать, что на итоговом изменении уровня грунтовых вод сказываются не только сезонные осадки, но и зоны ускорения/замедления, эрозии/аккумуляции вдоль реки.



А – векторы средних скоростей течения; Б – расположение сбойных берегов: 1 – прижимной берег, 2 – направление весеннего течения; В – направление циркуляционных течений в придонном слое; Г – зоны аккумуляции и эрозии: 1 – зона преимущественной эрозии, 2 – зона преимущественной аккумуляции

Рисунок 4.28 – Скорости речного потока и его воздействие на береговые линии

Прослеживается уменьшение изменения силы тяжести и уровня грунтовых вод при ортогональном удалении от берега. А наибольший интерес составляет зона ускорения скорости речного потока.

В этой зоне также наблюдается увеличение изменения силы тяжести и уровня грунтовых вод.

На рисунке 4.29 представлены изменение силы тяжести и уровень грунтовых вод на сентябрь 2020 г.

Прослеживается закономерность в увеличении уровня грунтовых вод в зонах ускорения, а также уменьшении при удалении от берега.

Как видно из рисунков 4.29 и 4.30, расположение скважин носит произвольный характер. Как говорилось ранее, автор предлагает располагать скважины в непосредственной близости к пунктам ГДП.

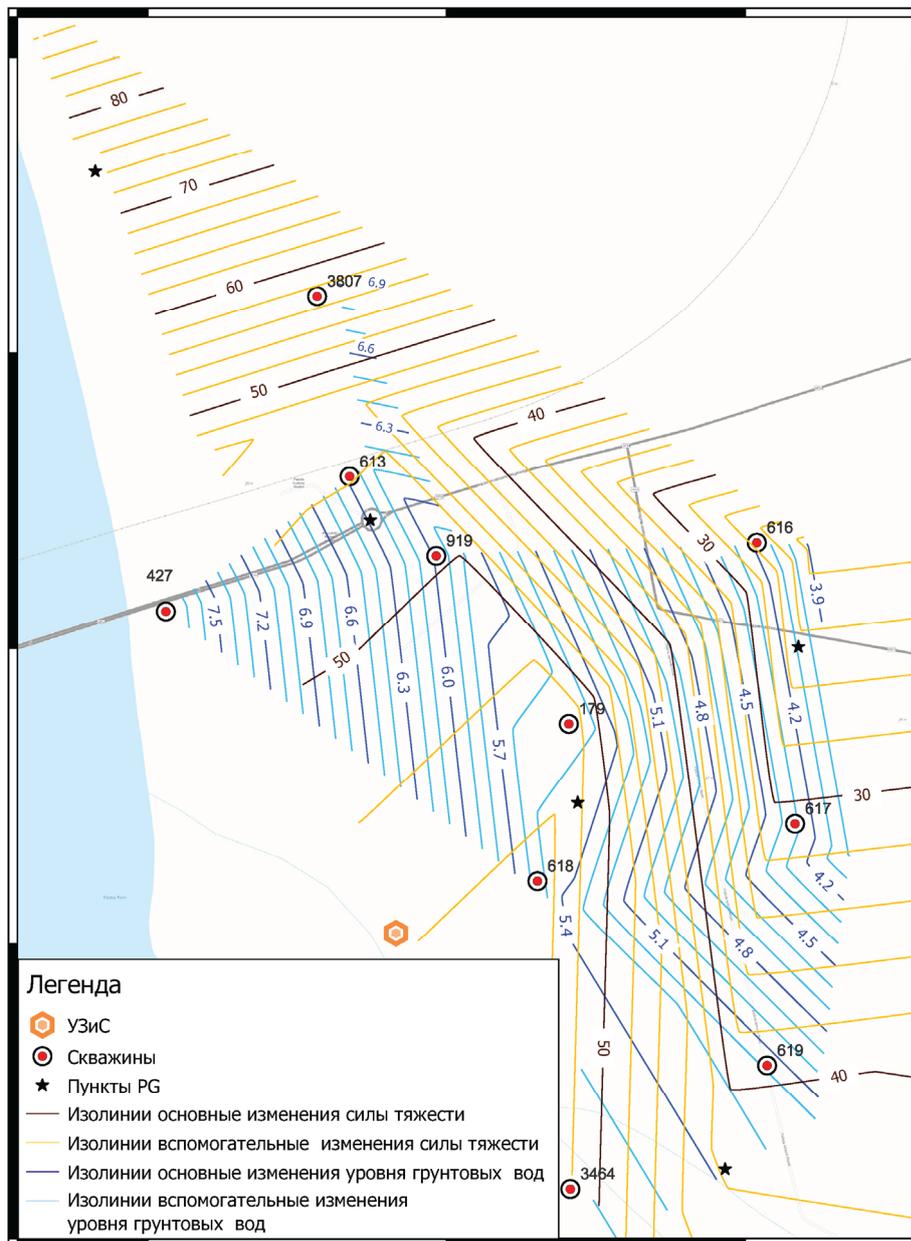


Рисунок 4.29 – Изолинии изменения уровня грунтовых вод и силы тяжести между минимумом уровня грунтовых вод (март 2020 г.) и максимум уровня грунтовых вод (сентябрь 2020 г.)

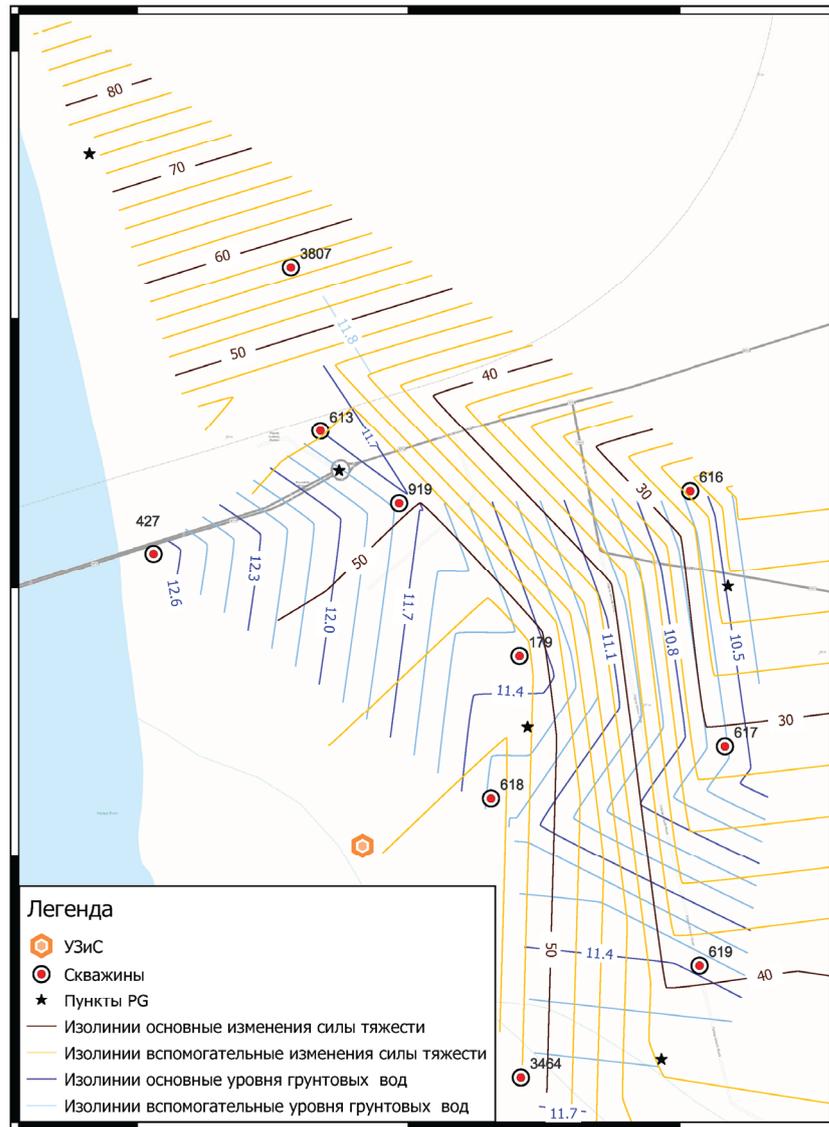


Рисунок 4.30 – Изолинии изменения силы тяжести между минимумом уровня грунтовых вод (март 2020 г.) и максимум уровня грунтовых вод (сентябрь 2020 г.)

#### 4.7 Моделирование изменения силы тяжести по гидрологическим данным

Проведем оценку точности полученных аппроксимирующих уравнений и найдем взаимосвязь между изменениями силы тяжести и уровнем грунтовых вод. Оценка точности выполнялась по формуле Гаусса. Наблюдения будем считать равноточными

$$m = \sqrt{\frac{\Delta_i^2}{n}}, \quad (4.32)$$

где  $\Delta_i^2$  – разность истинного значения и полученного по аппроксимации;

$n$  – количество измерений.

СКП для аппроксимирующего полинома уровня грунтовых вод с 2016 по 2021 г. (рисунок 4.31) составляет 0,86 м.

Для корректного вычисления необходимо использовать больше 15 значащих цифр формула

$$y = 0,001090190166947560x^4 - \\ 0,08567022965959840x^3 + 1,261536785199270x^2 - \\ 5,00776689635040x + 9,223872557563480. \quad (4.33)$$

СКП аппроксимирующего полинома среднего изменения силы тяжести на площадке УС с ноября 2019 г. по сентябрь 2021 г. (рисунок 4.32) года составляет 0,1 мкГал

$$y = 0,00000003044353314433x^4 - \\ 0,00536720447110549000x^3 + 354,8361285416710x^2 - \\ 10426063,031020400x + 114878689413,1840. \quad (4.34)$$

С учетом доказанной коррелированности уровня грунтовых вод и силы тяжести на площадке строительства УС, построенная функция оценивается с помощью аппроксимирующего полинома (рисунки 4.32, 4.33)

$$y = 0,00000000234269314067x^4 - \\ 0,00041314449627524700x^3 + 27,3221775032867x^2 \\ - 803048,235187716x + 8851048692,66866. \quad (4.35)$$

Вычислим связь между сезонными изменениями силы тяжести ( $\Delta g$ ) и уровнем грунтовых вод ( $\Delta ГР$ ).

Учитывая одинаковый порядок полиномов по формулам (4.33) и (4.34), получаем коэффициенты A, B, C, D и свободного члена (G) (таблица 4.34).

Таблица 4.34 – Соотношение ( $\Delta g$ ) к ( $\Delta GP$ ) аппроксимирующих полиномов изменения силы тяжести и уровня грунтовых вод

A	B	C	D	G
12,995100645415	12,991107274801	12,987110141532	12,983109325411	12,979104895032

На основании полученных данных смоделируем детальный график сезонных изменений силы тяжести.

Решая систему линейных уравнений, находим коэффициенты A, B, C, D, E, F и свободного члена (G) полиномиального уравнения шестого порядка (таблица 4.35)

Таблица 4.35 – Коэффициенты полиномиального уравнения сезонных вариаций силы тяжести на площадке УС

A	B	C	D	E	F	G
0,0003830	0,0261900	0,6573400	7,3815700	36,37289	69,195220	-44,872370

Тогда итоговый график сезонных вариаций силы тяжести для всей площадки приведен рисунок 4.34 и отражен в формуле

$$y = -0,000383x^6 + 0,02619x^5 - 0,65734x^4 + 7,38157x^3 - 36,37289x^2 + 69,195220x - 44,87237. \quad (4.36)$$

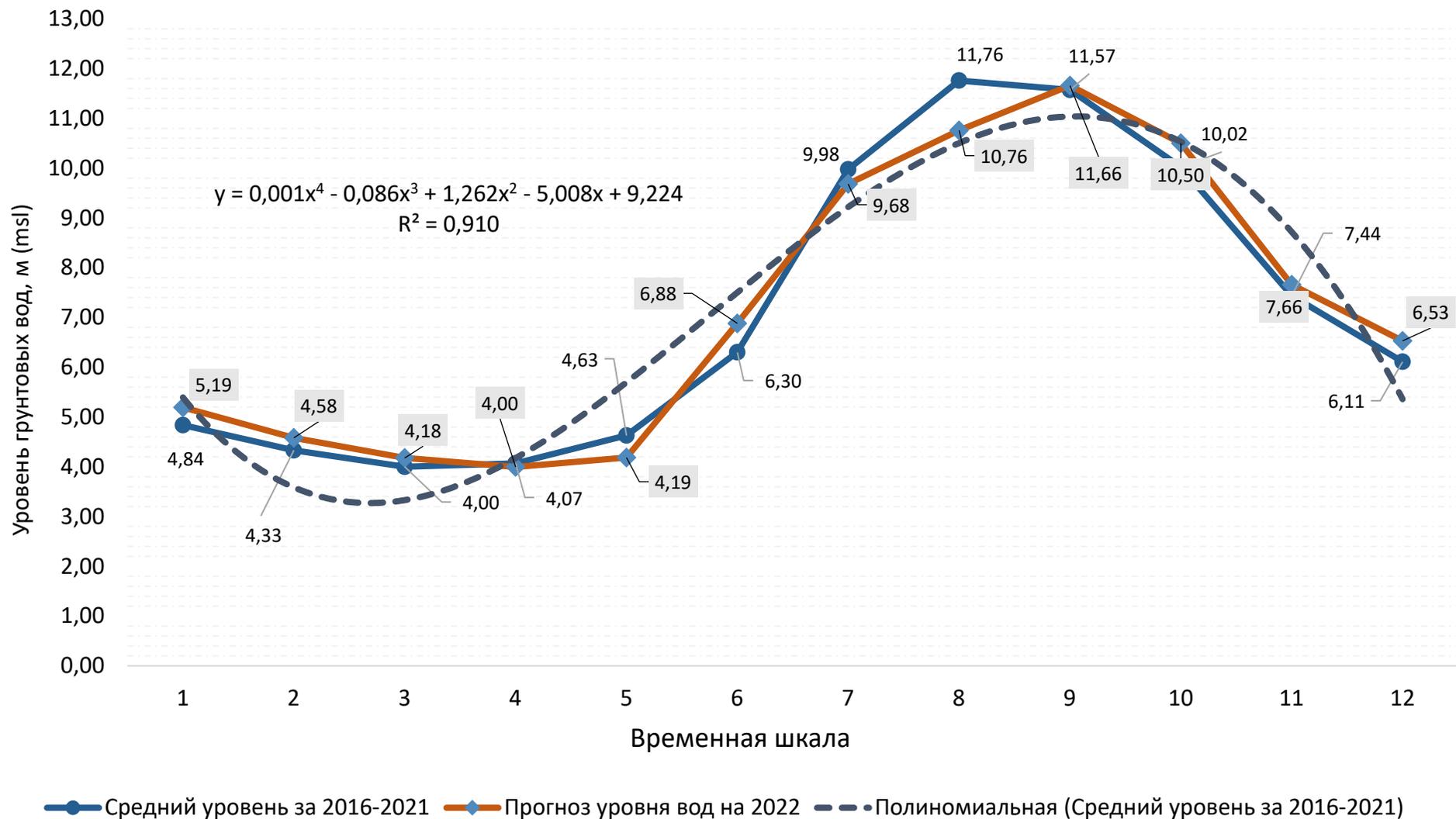


Рисунок 4.31 – Средний уровень грунтовых вод с 2016 г. по 2021 г. на площадке УС

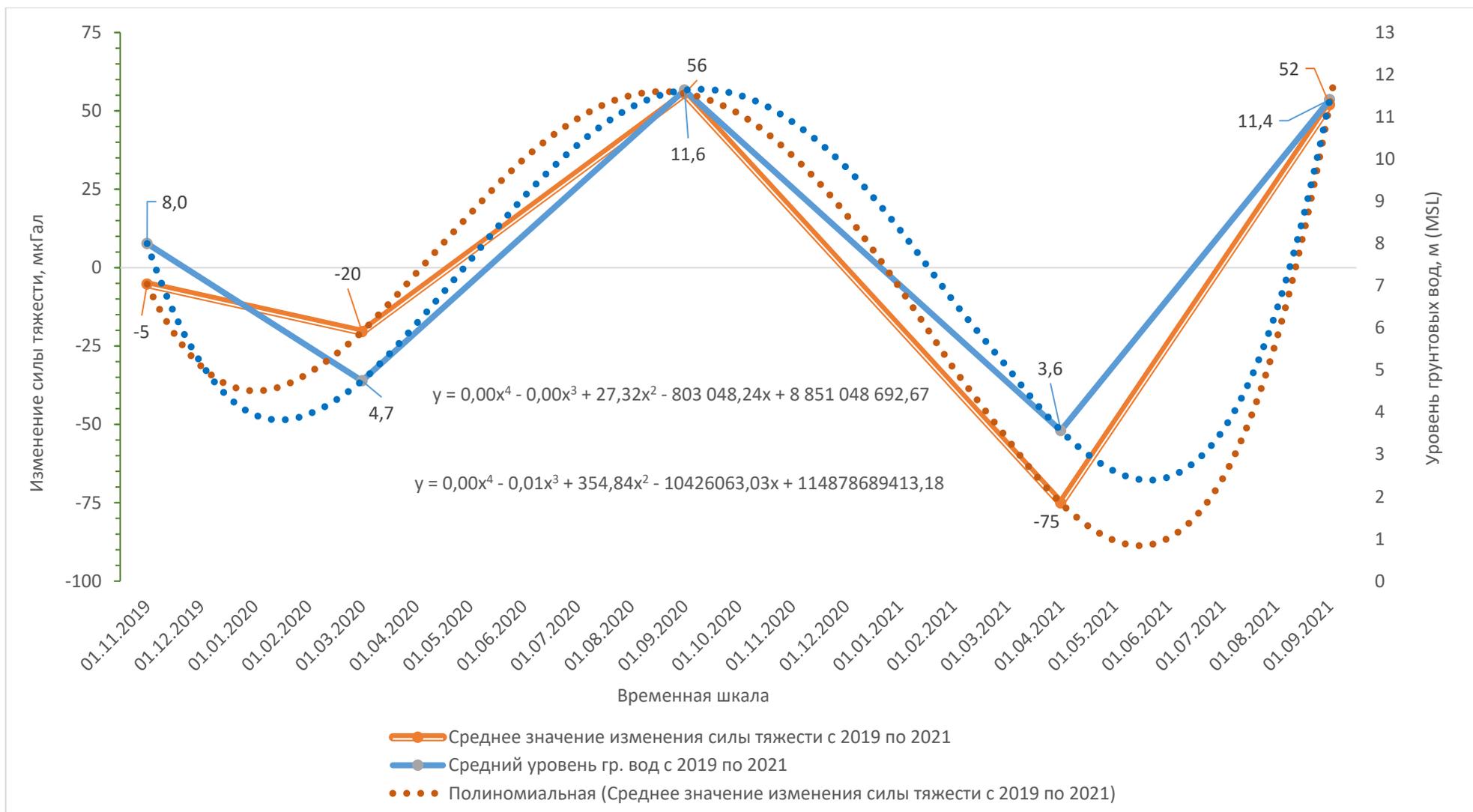


Рисунок 4.32 – Среднее изменение силы тяжести и уровня грунтовых вод по пунктам с 2019 г. по 2021 г. на площадке УС

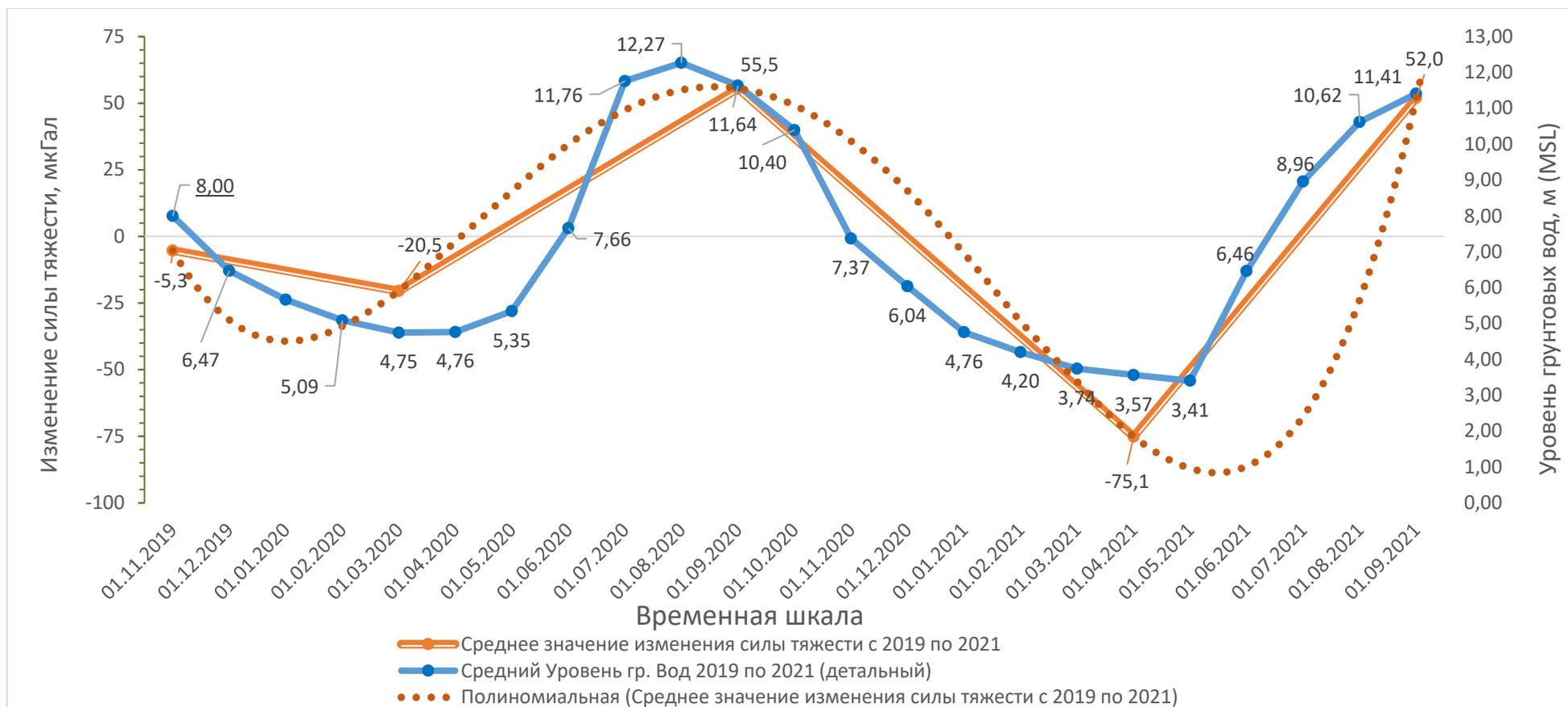


Рисунок 4.33 – Сопоставление графиков среднего изменения силы тяжести и детального уровня грунтовых вод с 2019 г. по 2021 г.

Средняя квадратическая погрешность построенной модели составляет составляет 12 мкГал. При этом средняя квадратическая погрешность аппроксимации полиномом средних ВСТ по многолетним наблюдениям составляет 27 мкГал (таблица 4.36, рисунок 4.34).

Таблица 4.36 – Разность измеренных значений ВСТ и модельных: по разработанной методике ( $\Delta_M$ ) и с использованием аппроксимации полиномом ( $\Delta_{ап}$ )

Дата	$\Delta_M$ , 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
<b>СКП, мкГал</b>	<b>11,9</b>	<b>26,6</b>

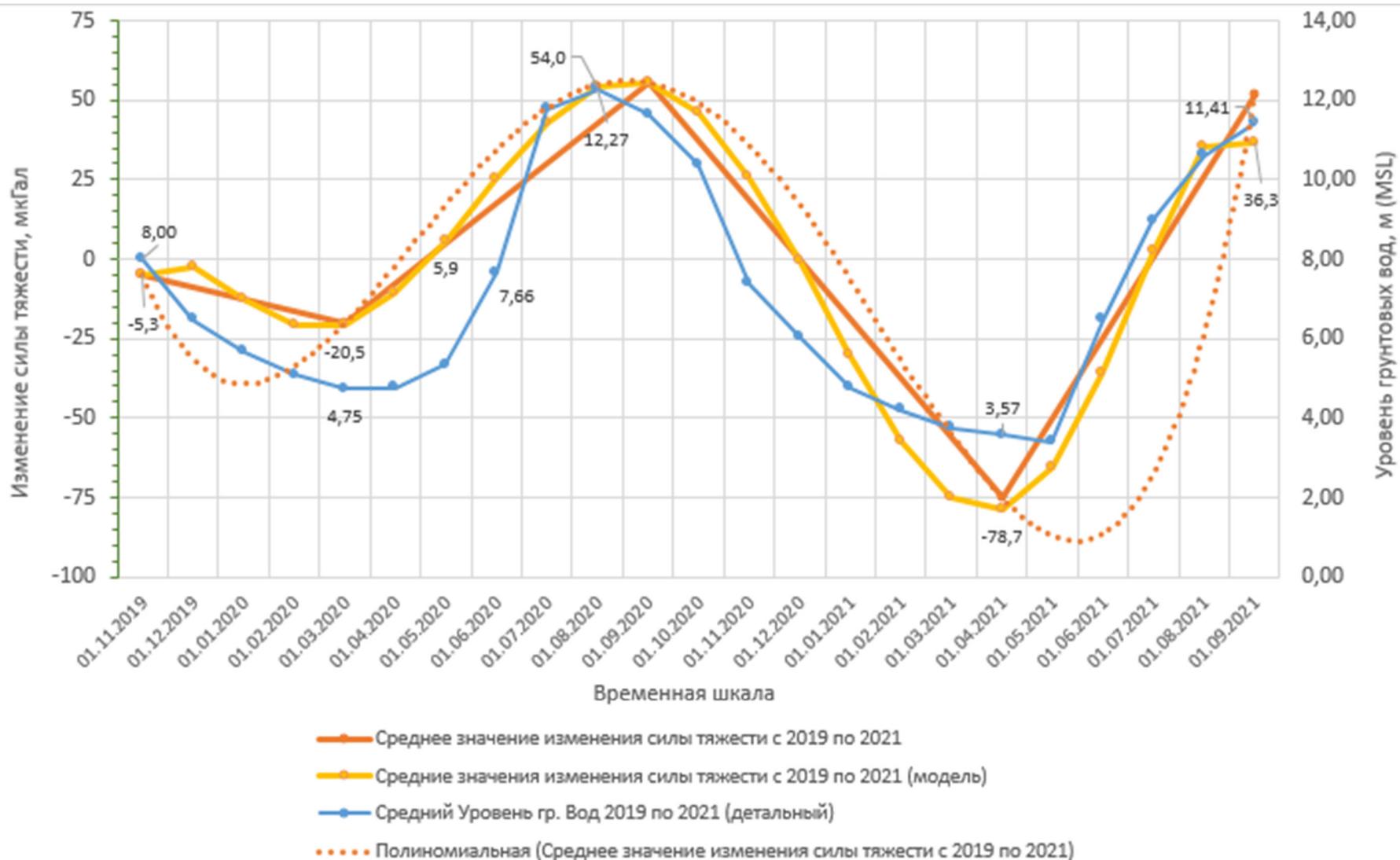


Рисунок 4.34 – Смоделированный график изменения силы тяжести на площадке УС с 2019 г. по 2021 г.

Тем самым построенная модель показывает лучшую точность по сравнению с аппроксимирующим полиномом.

#### 4.8 Выводы по разделу 4

1 Представлен алгоритм учета сезонных ВСТ и колебаний уровня грунтовых вод на пунктах ГДП.

2 Спроектирован экспериментальный полигон, на котором вычислены поправки традиционными методами.

3 Представлена блок-схема ключевых авторов и их исследований, опыт которых применялся для разработки новой методики.

4 Обработаны и проанализированы полевые гравиметрические наблюдения;

5 Выявлено изменение уровня грунтовых вод на значения силы тяжести и высоты пунктов ГДП.

6 Разработан метод вычисления уровня грунтовых вод на пунктах ГДП, поскольку на момент исследования скважины располагались произвольно, без привязки к ГДП.

7 Вычислены значения поправок в измеренные превышения по разработанной локальной гравиметрической карте с учетом плотности и влагонасыщенности грунта по геологическим исследованиям. Полученные поправки существенно меньше тех вертикальных смещений, которые наблюдаются у прибрежных пунктов ГДП на УС, что говорит о недостаточности применения традиционных методик.

8 Проводится доказательство коррелированности геотехнических параметров между собой путем вычисления коэффициента корреляции между исследуемыми геотехническими параметрами.

9 Проведена оценка точности функций геотехнических параметров  $\Phi$  ( $\Delta G, \Delta F$ ) и  $T$  ( $\Delta H, \Delta G, \Delta F$ ) Для их применения в разработанной методике.

10 Разработана методика учета геотехнических параметров на пунктах ГДП, улучшающая точность определения высот пунктов ГДП.

11 Представлена апробация методики учета ВСТ с помощью ГНСС-технологий. Для этого были проанализированы результаты спутниковых наблюдений относительными и PPP методами на пунктах ГДП, а также ближайшие к площадке исследования УС пункты ITRF. Разработана конструкция пунктов ГДП, для реализации дифференциальных наблюдений в одинаковые отрезки времени.

12 Выполнен прогноз и разработана модель изменения силы тяжести в разные сезоны года. Выполнена оценка точности модели. Точность модели выше, чем у аппроксимирующего полинома.

13 Продемонстрированы явления, влияющие на заполняемость грунтовых вод в прибрежной полосе, что, в свою очередь, оказывает влияние на силу тяжести.

## 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 геодинимических исследований площадок строительства УС для создания единой методики учета сезонных вариаций в результаты геодезических наблюдений.

.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Анализ геоинформационных технологий в целях изучения визуализации и отображения вертикальных и горизонтальных деформаций поверхности Земли / М. А. Боярчук, И. Г. Журкин, В. Б. Непоклонов, П. Ю. Орлов – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2022. – № 10. – С. 53–61.

2 Андреев, В. К. Оценивание параметров локальной геодинамики геодезическими методами. – Текст : непосредственный // X Международная научно-практическая конференция «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. На рубеже веков» (г. Москва, 14–15 февраля 2019 г.). – Москва, 2019.

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.

4 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.

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.

6 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. – 2022. – Т. 7, № 4. – С. 363–372. – DOI 10/55186/2413046X\_7\_4\_210. – URL: <https://qje.su/ru/storage/view/142379>. – Дата публикации: 21.04.2022. (дата обращения: 25.01.2024).

7 Биндеман, Н. Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод / Н. Н. Биндеман, Л. С. Язвин. – Москва : Недра, 1970. – 217 с. – Текст : непосредственный.

8 Бычков, С. Г. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. / С. Г. Бычков, А. С. Долгаль, А. А. Симанов. – Пермь : УрО.РАН, 2015. – 142 с. – Текст : непосредственный.

9 Вершинина, Ю. В. Геодезическое обеспечение мониторинговых наблюдений за деформационными процессами на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений : специальность 25.00.32 Геодезия : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вершинина Юлия Васильевна. – Санкт-Петербург, 2015. – 134 с. – Текст : непосредственный.

10 Воронков, О. К. Основания плотин и их проблемы / О. К. Воронков, Л. Ф. Ушакова. – Санкт-Петербург : АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2018. – 391 с. – ISBN 978-5-85529-194-0. – Текст : непосредственный.

11 Ганагина, И. Г. Исследование вариаций гравитационного потенциала и его характеристик, обусловленных динамикой водных масс крупных водоемов : специальность 05.24.01 Геодезия: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ирина Геннадьевна Ганагина. – Новосибирск, 1996. – Текст : непосредственный.

12 Ганьшин, В. Н. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов : учебно-методическое пособие / В. Н. Ганьшин, А. Ф. Стороженко, Н. А. Буденков. – Москва : Недра, 1981. – 99 с. – Текст : непосредственный.

13 ГКИНП (ГНТА)-03-010–03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов : дата введения 01.02.2004. – Москва : Роскартография, 2004. – 120 с. – Текст : непосредственный.

14 ГКИНП (ГНТА)-04-122–03. Инструкции по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России : дата введения 01.02.2004. – Москва : ЦНИИГАиК, 2004. – 220 с. – Текст : непосредственный.

15 ГКИНП (ГНТА)-04-25–01. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. Требования к высокоточным сетям. Абсолютные измерения ускорения силы тяжести баллистическими гравиметрами : дата введения 01.03.2001. – Москва : ЦНИИГАиК, 2001. – 66 с. – Текст : непосредственный.

16 ГКИНП (ОНТА)-01-271–03. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS : дата введения 13.05.2003. – Москва : РОСКАРТОГРАФИЯ, 2003. – 66 с. – Текст : непосредственный.

17 ГКИНП (ОНТА)-02-262–02. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS : дата введения 01.03.2002. – Москва : ЦНИИГАиК, 2002. – 125 с. – Текст : непосредственный.

18 ГОСТ 13017–83. Гравиметры наземные. Общие технические условия : дата введения 01.01.1985. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1985. – 27 с. – Текст : непосредственный.

19 ГОСТ 24846–2019. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений : дата введения 01.01.2021 – Москва : Стандартинформ, 2020. – 13 с. – Текст : непосредственный.

20 ГОСТ Р 58854–2020. Требования к созданию ориентированных аэроснимков для построения стереомоделей застроенных территорий : дата введения 04.06.2020. – Москва : ТК 404 Геодезия и картография, 2020. – 21 с. – Текст : непосредственный.

21 ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования : дата введения 01.06.2021. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 30 с. – Текст : непосредственный.

22 ГОСТ Р 70689–2023. Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Общие требования к проведению работ: дата введения 01.09.2023. – Москва: ФГБУ «РСТ», 2023. – 26 с. – Текст : непосредственный.

23 ГОСТ Р 70690–2023. Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги: дата введения 01.09.2023. – Москва: ФГБУ «РСТ», 2023. – 15 с. – Текст : непосредственный.

24 ГОСТ Р 71863–2024. Фототопография. Лазерное сканирование. Общие положения : дата введения 01.03.2025. – Москва : ФГБУ "РСТ", 2024. – 28 с. – Текст : непосредственный.

25 ГОСТ Р 7188–2024. Системы беспилотные авиационные в строительстве, применяемые для производства геодезических работ. Общие требования : дата введения 01.02.2026. – Москва : ФГБУ "РСТ", 2025. – 19 с. – Текст : непосредственный.

26 Гофман-Велленгоф, Б. Физическая геодезия / Б. Гофман-Велленгоф, Г. Мориц. – Москва : МИИГАиК, 2007. – 426 с. – Текст : непосредственный.

27 Инструкция по вычислению нивелировок. – Москва : Недра, 1971. – 112 с. – Текст : непосредственный.

28 Исследование неприливных изменений силы тяжести и их влияния на геодезические измерения : отчет о НИОКТР / В. В. Бузук, И. Г. Вовк. – Новосибирск, 1986. – 81 с. – Текст : непосредственный.

29 Калининков, В. В. Влияние атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 методом PPP / В. В. Калининков, 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.

30 Киселев, П. А. Изучение баланса подземных вод в слоистых толщах по режимным данным / П. А. Киселев. – Москва : Недра, 1975. – 288 с. – Текст : непосредственный.

31 Костицын, В. И. О корреляционной зависимости между колебаниями уровня грунтовых вод и изменениями силы тяжести / В. И. Костицын – Текст : электронный // Полоцкий государственный университет : электронный журнал. – 2016. – URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/18390>.

32 Кравчук, И. М. Разработка методов вычисления нормальных высот по результатам спутниковых измерений в инженерно-геодезических работах : специальность 25.00.32 Геодезия : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кравчук Иван Михайлович – Москва, 2010. – 24 с. – Текст : непосредственный.

33 Кутушев, Ш-И. Б. Геосистемные исследования процессов формирования зон геодинамических рисков региональных нефтегазоносных территорий (на примере Башкирии) : специальность 25.00.32 Геодезия : автореферат диссертации на соискание доктора технических наук / Кутушев Шайхил-Ислам Бурганович. – Москва, 2021. – 48 с. – Текст : непосредственный.

34 Люцко, Е. А. Мониторинг состояния плотины Чиркейской ГЭС по перемещениям / Е. А. Люцко. – Текст : непосредственный // Известия ВНИИГ. – 2010. – Т. 276. – С. 41–48.

35 Маккавеев, Н. И. Русло реки и эрозия в её бассейне / Н. И. Маккавеев. – Москва : АН СССР, 1955. – 346 с. – Текст : непосредственный.

36 Маркович, К. И. Совершенствование геодезических методов мониторинга геодинамических процессов с привлечением глобальных моделей Земли и обеспечением многодисциплинарного подхода : специальность 25.00.32 Геодезия : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Маркович Кирилл Игоревич. – Москва, 2021. – 24 с. – Текст : непосредственный.

37 Мельников, А. Ю. Анализ точности метода Precise Point Positioning для оценки возможности его применения в геодинамических исследованиях его применения в геодинамических исследованиях / А. Ю. Мельников. – Текст : непосредственный // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 605–615. – DOI 10.30533/0536-101X-2018-62-6-605-615.

38 Методика оценки и учета влияния вариаций вектора силы тяжести на результаты наблюдений за положением отвесов плотин ГЭС : отчет о НИОКТР / И. Г. Вовк. – Новосибирск, 1988. – 41 с. – Текст : непосредственный.

39 Михайлов, Л. Е. Грунтовые воды / Л. Е. Михайлов – Ленинград : ЛПИ, 1982. – 40 с. – Текст : непосредственный.

40 Морозов, А. В. Исследование методики определения разности высот по ГНСС наблюдениям, присвоение специальности инженер-геодезист, защищена 26.07.2019; Место защиты: ГУЗ; Работа выполнена : ГУЗ, кафедра геодезии и геоинформатики. – Москва, 2019 – 99 с. – Текст : непосредственный.

41 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.

42 НП-031–01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – Москва : ФБУ НТЦ ЯРБ, 2016. – 29 с. – Текст : непосредственный.

43 НП-041–22. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования по безопасности к строительным конструкциям зданий и сооружений атомных станций : приказ от 26 декабря 2022 года № 464. – URL: <https://docs.secnrs.ru/documents/nps/%D0%9D%D0%9F-041-22/%D0%9D%D0%9F-041-22.htm>. – Текст : электронный.

44 О сезонных деформациях горных склонов в районе Токтогульской ГЭС / Б. Э. Эмильбеков, Б. Ц. Манжиков, К. Тилегенов, А. С. Садыкова. – Текст : непосредственный // Вестник КРСУ. – 2006. – Т. 6, № 7. – С. 45–50.

45 Огородова, Л. В. Высшая геодезия. Часть III. Теоретическая геодезия. : учебник для вузов / Огородова Л. В. – Москва : Геодезкартиздат, 2006. – 384 с. – ISBN: 5-86066-076-6. – Текст : непосредственный.

46 Огородова, Л. В. Гравиметрия / Л. В. Огородова, Б. П. Шимбирев, А. П. Юзефович. – Москва : Недра, 1978. – 325 с. – Текст : непосредственный.

47 Огородова, Л. В. О связи высоты геоида и квазигеоида с аномалиями высоты / Л. В. Огородова. – Текст : непосредственный // Известия вузов: Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 3.– С. 12–16.

48 Определение составляющих уклонения отвесной линии на территории Западной Сибири методом численного дифференцирования [Текст] / А. П. Карпик, В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 15–29.

49 Организация и производство наблюдений за режимом уровня, напора и дебита подземных вод (методические рекомендации). – Москва : Министерство геологии СССР, 1983. – 47 с. – Текст : непосредственный.

50 Основания и фундаменты / А. Б. Пономарев, А. В. Захаров, Д. Г. Золотозубов, С. В. Калошина. – Пермь : Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2021. – 283 с. – Текст : непосредственный.

51 Остроумов, Л. В. Разработка технологии определения нормальных высот с использованием спутникового метода на акватории морей : специальность 25.00.32 Геодезия : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Остроумов Леонид Валерьевич. – Москва, 2011. – 24 с. – Текст : непосредственный.

52 П-648 Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами, Минэнерго СССР. Гидропроект им. С. Я. Жука. – Москва : Энергия, 1980. – Текст : непосредственный.

53 Пин АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. Правила и нормы в атомной энергетике. – Госстрой СССР : Минэнерго СССР, 1987. – 22 с. – Текст : непосредственный.

54 ПиНАЭ-5.10–87. Основания реакторных отделений атомных станций. – Москва : Минатомэнерго СССР, 1989. – 68 с. – Текст : непосредственный.

55 Попадьев, В. В. О преимуществе системы нормальных высот / В. В. Попадьев. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография – 2018. – № 9. – С. 2–9.

56 Попадьев, В. В. Оценка изложения теории высот в отечественной литературе / В. В. Попадьев, И. Ю. Мосолкова, С. С. Рахмонов – Текст : непосредственный // Геодезия и картография – 2021. – № 10. – С. 52–63.

57 Пособие по производству геодезических работ в строительстве. – Москва : ЦНИИОМТП, 1985. – 115 с. – Текст : непосредственный.

58 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации : приказ Минэнерго // Российская газета. – 2003. – № 229. – 229 с. – Текст : непосредственный.

59 Работы гравиметрические наземные высокоточные и морские. Термины и определения. – Москва : ЦНИИГАиК, 1995. – 22 с. – Текст : непосредственный.

60 РБ-019–18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. – 2018. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/556827973>. – Текст : электронный.

61 Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений : дата введения 01.01.1975. – Москва : Стройиздат, 1975. – 95 с. – Текст : непосредственный.

62 Серапинас, Б. Б. Геодезические основы карт. Гравитационное поле. Связь координат. Высоты. : официальный сайт / Б. Б. Серапинас. – URL: [http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/docs/GOK/gok\\_lecture\\_7.pdf6](http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/docs/GOK/gok_lecture_7.pdf6), (дата обращения: 24.08.2022). – Текст : электронный.

63 Серебрякова, Л. И. Предварительные результаты обработки и анализа повторных геодезических измерений, выполненных на Северо-Кавказском геодинамическом полигоне Росреестра / Л. И. Серебрякова, А. В. Басманов – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С 44.

64 СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Часть III. Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства. – Москва : ГОССТРОЙ РОССИИ, 2004. – 110 с. – Текст : непосредственный.

65 СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства.. – Москва : Госстрой РФ, 1997. – 91 с. – Текст : непосредственный.

66 СП 11-105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ. – Москва : ПНИИИС Госстроя России, 1997. – 43 с. – Текст : непосредственный.

67 СП 151.13330.2012. Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Часть I. Инженерные изыскания для разработки предпроектной документации. – Москва : ТК 465 Строительство, 2013. – 186 с. – Текст : непосредственный.

68 СП 151.13330.2012. Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Часть II. Инженерные изыскания для разработки проектной и рабочей документации и сопровождения строительства – Москва : ТК 465 Строительство, 2013. – 133 с. – Текст : непосредственный.

69 СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* (с Изменениями № 1–5). – Москва : Стандартинформ, 2017. – 151 с. – Текст : непосредственный.

70 СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – 2017. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/556610334>. – Текст : электронный.

71 СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения (Актуализированная редакция СНиП 11-02-96) Инженерные изыскания для строительства. Основные положения (Актуализированная редакция СНиП 11-02-96). – Москва : Стандартинформ, 2016. – 90 с. – Текст : непосредственный.

72 СП 50-102–2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов – Москва : Госстрой России, 2004. – 112 с. – Текст : непосредственный.

73 Спесивцев, А. А. Разработка методики учета сезонных геодинамических эффектов с использованием данных о гравитационном поле Земли : специальность 25.00.32 Геодезия : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Спесивцев Александр Александрович. – Москва, 2017. – 24 с. – Текст : непосредственный.

74 СТО 95 12022–2017. Инженерные изыскания для строительства атомных электростанций. – Москва : ООО «ЦТКАО», 2017. – 42 с. – Текст : непосредственный.

75 СТО СРО-Г 60542954 00007–2023. Геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений атомных станций. – Москва : СРО «СОЮЗАТОМГЕО», 2023. – 137 с. – Текст : непосредственный.

76 Суздаев, А. С. Гармонический анализ переменного гравитационного поля Земли в геодезии : специальность 05.24.01 Геодезия : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Суздаев Анатолий Степанович. – Новосибирск, 1999. – 129 с. – Текст : непосредственный.

77 Терещенко, В. Е. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений / В. Е. Терещенко, Е. К. Лагутина – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Том 24, № 2. – С. 76–94. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-2-76-94.

78 Торге, В. Гравиметрия / В. Торге. – Москва : Мир, 1999. – 417 с. – Текст : непосредственный.

79 Трофимов, Д. А. Определение координат пунктов из ГНСС-наблюдений методом PPP : учебное пособие / Д. А. Трофимов – Санкт-Петербург, 2019. – 73 с. – Текст : непосредственный.

80 Устинов, А. В. Разработка методики геодезического мониторинга гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания (на примере здания Загорской ГАЭС-2) : специальность 1.6.22 Геодезия : диссертация на соискание кандидата технических наук. – Новосибирск, 2022. – 156 с. – Текст : непосредственный.

81 Устинов, А. В. Результаты мониторинга вертикальных перемещений в процессе компенсационного нагнетания на опыт 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. 128–141.

82 Федоровский, В. Г. Прогноз осадок фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит / В. Г. Федоровский, С. Г. Безволев – Текст

: непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2000. – № 4. – С. 276–284.

83 Хаин, В. Е. Гравитационные эффекты перед сильными удаленными землетрясениями / В. Е. Хаин, Э. Н. Халилов. – Текст : непосредственный // Вестник Международной академии наук (русская секция) – Международное Научное Издательство SWB, ISBN 978-9952-451-00-9; BURGAS SWB – 2007. – С. 46–52.

84 Чалов, Р. С. Речные излуины / Р. С. Чалов, А. С. Завадский, А. В. Панин. – Москва : МГУ, 2004. – 371 с. – Текст : непосредственный.

85 Чистякова, Е. К. Разработка комплексной методики учета неприливных эффектов на пунктах Государственной фундаментальной гравиметрической сети : специальность 1.6.22 Геодезия : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чистякова Екатерина Александровна. – Москва, 2023. – 120 с. – Текст : непосредственный.

86 Шароглазова, Г. А. Применение гравиметрии в решении геодезических задач : конкурсная научная работа пособие / Г. А. Шароглазова, К. И. Маркович. – Полоцкий государственный университет : Полоцкий государственный университет, 2012. – 84 с. – Текст : непосредственный.

87 Шестаков, Н. В. Учет сезонных вариаций координат пунктов GPS/ГЛОНАСС-наблюдений при исследовании современных движений земной коры / Н. В. Шестаков, Г. Н. Герасимов, М. Д. Герасименко. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2009. – № 9. – С. 46–51.

88 Юзефович, А. П. Поле силы тяжести и его изучение / А. П. Юзефович. – Москва : МИИГАиК, 2014. – 194 с. – Текст : непосредственный.

89 Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration / M. C. Eckl, R. A. Snay, T. Soler et al. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2001. – № 12 – P. 633–640.

90 Anthes, R. Journal of Geophysical Research / R. Anthes, R. Ware. – Текст : непосредственный // GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. – 1992. – № 97. – P. 15787–15801.

91 Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake / E. Fielding, A. Bevington, J. Kargel et. al. – Текст : непосредственный // Science. – America : American Association for the Advancement of Science. – 2016. – No. 351. – P. 62–69 – DOI 10.1126/science.aac8353.

92 Hughes, C. W. An Oceanographer's Guide to GOCE and the Geoid. / C. W. Hughes, R. J. Bingham. – Текст : непосредственный // Ocean Science. – 2008. – Vol. 4, No. 1. – P.15–29.

93 International Terrestrial Reference Frame (ITRF) – URL: <https://itrf.ign.fr/en/homepage> (дата обращения: 23.01.2023). – Текст : электронный.

94 Klos, Anna. Identifying the sensitivity of GPS to non tidal loadings at various time resolutions: examining vertical displacements from continental Eurasia / Anna Klos, Henryk Dobslaw, Robert Dill. – Текст : электронный // GPS Solutions : электронный журнал. – URL:<https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-021-01135-w>.

95 Li, Z. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Atmospheric Correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR Integration / Z. Li, E. Fielding. – Текст : непосредственный // Geophysical Research Letters. – 2005. – No. 110. – P. B03410..

96 MacDonald, A. Diagnosis of three-dimensional water vapor using slant observations from a GPS network / A. MacDonald, Y. Xie – Текст : непосредственный // Monthly Weather Review. – 2002. – № 130. – С. 386–397.

97 Ray, J Subseasonal GNSS positioning errors / J Ray, J Griffiths, X Collilieux – Текст : электронный // Geophysical Research Letters : электронный журнал. – URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2013GL058160>. – Дата публикации: 26.11.2013..

98 Ries, J. C. Combined Gravity Solution from SLR and GRACE/GRACE-FO / J. C. Ries, B. D. Tapley. – Текст : непосредственный // Geodesy for a Sustainable Earth. – 2022. – Vol. 154. – P. 175–181.

99 Separation Between Geoid and Quasi-Geoid: Analysis of the Differences Between Normal-Orthometric and Rigorous Orthometric Heights / Fabio Luiz Albarici, Gabriel Guimarães, Ismael Foroughi, Marcelo Santos – Текст : непосредственный //

Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, 2018. – 41(3). – P. 71–81. – DOI 10.11137/2018\_3\_71\_81.

100 Tanaka, T. Hydrological gravity response detection using a gPhone below- and aboveground / T. Tanaka, R. Miyajima, H. Asai. – Текст : электронный // Earth Planets Space : электронный журнал. – URL: <https://doi.org/10.5047/eps.2012.06.012>. – Дата публикации: March 6, 2013.

101 Tapley, B. D The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results / B. D Tapley, M. Watkins. – Текст : непосредственный // Geophysical Research Letters. – 2004. – Vol. 31, No. 9. – P. 1–4.

102 Watkins, M The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results / M Watkins, B. D. Tapley. – Текст : непосредственный // Geophysical Research Letters Geophysical Research Letters. – 2004. – Vol. 31, No 9. – P. 1–4.

103 Williams, S. D. P. Non-tidal ocean loading effects on geodetic GPS heights / S. D. P. Williams, N. T. Penna – Текст : электронный // Geophysical Research Letters : электронный журнал. – URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GL046940>. – Дата публикации: 03.04.2011.

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ



В Диссертационный совет 24.2.402.01  
(Д 212.251.02), 630108, ул. Плахотного,  
10, Новосибирск, Новосибирская обл.

**АКТ**

**о внедрении результатов**

кандидатской диссертационной работы

Морозова Артема Викторовича

*(Фамилия, имя, отчество)*

на тему «Разработка методики учета вариаций силы тяжести при строительстве уникальных сооружений»

*(Наименование диссертации)*

Настоящий акт подтверждает, что в нашей организации было проведено тщательное изучение теоретических разработок и практических рекомендаций, представленных в диссертационном исследовании Морозова А.В. — в том числе, концепции учета геотехнических параметров (уровня грунтовых вод, гравитационного поля, высот и плотности грунта) на исходных пунктах геодезической сети в прибрежных районах и зонах с серьезными гидрогеологическими изменениями, а также идеи создания специальной конструкции исходных пунктов для реализации комплексных многолетних мониторинговых наблюдений. В первую очередь, мы согласны с Морозовым А.В. относительно необходимости разработки технологических процедур для учета колебаний уровня грунтовых вод и гравитационного поля при определении нормальных высот исходных пунктов геодезической сети, что будет особенно полезно при строительстве и эксплуатации крупных инженерных объектов. Мы считаем, что предложенная методика отвечает требованиям научной обоснованности и ее применение на практике способствует единообразию подходов и прозрачности полученных результатов геодезических наблюдений.

Также отмечаем, что большинство теоретических исследований и практических алгоритмов учета изменений геотехнических параметров в результатах геодезических наблюдений, опубликованных в нормативной документации, были выполнены в XX веке и уже устарели с точки зрения современных методов. Значительным достоинством диссертационной работы является общий методологический подход, включающий анализ существующих

методик учета геотехнических параметров и выявление их недостатков, что послужило основанием для разработки новой методики.

Практически особенно ценным является предложенный в диссертации алгоритм определения зависимости геотехнических параметров и их учета на экспериментальном полигоне. В результате удалось снизить СКП невязки полигона на 50%. По нашему мнению, это представляет собой качественный прорыв и подчеркивает важность правильного выбора и расположения исходных пунктов геодезической сети.

Результаты исследования Морозова А.В. нашли применение в нашей компании при оценке и прогнозировании состояния исходных пунктов геодезической сети, а также позволили выявить сезонные колебания деформаций некоторых реперов.

Генеральный директор



Т.М. Алекперов