

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»  
(СГУГиТ)

Кафедра инженерной геодезии и  
маркшейдерского дела  
Выпускная квалификационная работа  
соответствует уста-  
новленным требованиям и направляется в  
ГЭК для защиты  
Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ А. А.  
Шоломицкий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Программа специалитета

21.05.01 – Прикладная геодезия

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ  
НИВЕЛИРОВАНИЯ III – IV КЛАССОВ  
ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Выпускник \_\_\_\_\_ И. А.  
Мезенцев  
(подпись)

Руководитель \_\_\_\_\_ Г. А. Уставич  
(подпись)

Консультанты \_\_\_\_\_ Г. А. Уставич  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(подпись) Г. А. Уставич

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ А. С. Репин  
(подпись)

Новосибирск - 2019

Министерство науки и высшего образования Российской  
Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «СИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОСИСТЕМ И  
ТЕХНОЛОГИЙ»  
(СГУГиТ)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ИГиМД \_\_\_\_\_ А. А. Шоломицкий  
« 29 » апреля 2019 г.

ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Обучающегося Мезенцева Ивана Абид оглы \_\_\_\_\_

Группа ПГ-53 Институт геодезии и маркшейдерского дела  
Специальность 21.05.01 – Прикладная геодезия  
\_\_\_\_\_ (код, наименование)

Тема ВКР: Разработка методики нивелирования III – IV классов тригонометрическим способом

Руководитель<sup>1</sup> Уставич Георгий Афанасьевич

Ученое звание, ученая степень д.т.н.,  
профессор \_\_\_\_\_

Место работы, должность руководителя СГУГиТ, кафедра ИГиМД  
профессор \_\_\_\_\_

Срок сдачи полностью оформленного задания на кафедру  
29.04.2019 г. \_\_\_\_\_

Задание на ВКР (перечень рассматриваемых вопросов):

1.Выполнить анализ существующих способов и методов создания государственных сетей нивелирования и высотных сетей сгущения.

1 Научный руководитель – для магистерских диссертаций

2. Выполнить анализ исследований тригонометрического нивелирования II - IV классов, провести собственное исследование.

Вопросы экономики: Выполнить расчет сметной стоимости проведения нивелирных работ III класса точности

Вопросы безопасности жизнедеятельности: Основные правила безопасности при проведении полевых нивелирных работ.

Перечень графического материала с указанием основных чертежей и (или) иллюстративного материала (формат А1): не планируется

Исходные данные к ВКР (перечень основных материалов, собранных в период преддипломной практики):

Нормативная документация, материалы исследований по данной тематике, материалы, собранные при проведении собственного исследования в лабораторных условиях

Консультанты:

по экономике\*

Уставич Г. А., СГУГУТ, кафедра ИГиМД, профессор

(ФИО, место работы и должность)

по вопросам безопасности жизнедеятельности\*

Уставич Г. А., СГУГУТ, кафедра ИГиМД, профессор

(ФИО, место работы и должность)

#### ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ ВКР

Номер этапа	Этапы ВКР	Срок исполнения
1	Начало выполнения ВКР	29.04.2019
2	Подбор литературы и исходных материалов	30.04.2019
3	Выполнение исследовательских, экспериментальных, расчетных работ (нужное подчеркнуть)	04.05.2019
4	Выполнение графических (иллюстративных) работ	08.05.2019
5	Раздел 1. Анализ способов создания высотной сетки	09.05.2019
6	Раздел 2. Основные геометрические параметры тригонометрического нивелирования	12.05.2019
7	Раздел 3. Обоснование и выбор методики нивелирования III - IV классов тригонометрическим способом	15.05.2019
8	Раздел 4. Обоснование и выбор методики нивелирования II - III классов тригонометрическим способом	18.05.2019
9	Раздел 5. Вопросы экономики	20.05.2019
10	Раздел 6. Вопросы безопасности	20.05.2019
11	Первый просмотр руководителем	16.05.2019
12	Второй просмотр руководителем	02.06.2019
13	Срок сдачи ВКР на кафедру	06.06.2019

«29» апреля 2019 г.

Руководитель \_\_\_\_\_

(Подпись)

Консультант Уставич Г. А.

(ФИО, подпись)

Уставич Г. А.

(ФИО, подпись)

Задание принял к исполнению и с графиком согласен

(подпись)

## РЕФЕРАТ

Мезенцев Иван Абид оглы. Разработка методики нивелирования III – IV классов тригонометрическим способом.

Место дипломирования: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, кафедра инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Руководитель – докт. техн. наук, профессор СГУГиТ Уставич Г. А.

2019 г., 21.05.01 «Прикладная геодезия», программа специалитета.

83 с., 25 табл., 22 рис., 11 источников, 1 приложение.

НИВЕЛИРОВАНИЕ, ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЕ  
НИВЕЛИРОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА, ТАХЕОМЕТР,  
ОШИБКА, ИССЛЕДОВАНИЕ, ВЫВОД.

Целью выпускной квалификационной работы является анализ и проведение исследований по выполнению тригонометрического нивелирования II – IV классов.

В выпускной квалификационной работе рассмотрены основные существующие методы проведения тригонометрического нивелирования II – IV классов, составлена методика к его выполнению.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ВЫСОТНОЙ СЕТКИ.....	7
1.1 Принципиальная схема создания высотных опорных сетей в СССР (РФ).....	7
1.2 Способы создания высотных сетей сгущения.....	15
1.3 Виды нивелирования. Ошибки в измерениях.....	17
2 ОСНОВНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ.....	26
2.1 Технологическая схема тригонометрического нивелирования.....	26
2.2 Основные источники ошибок тригонометрического нивелирования.....	32

3	ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДИКИ НИВЕЛИРОВАНИЯ III – IV КЛАССОВ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ.....	35
3.1	Проведение исследования в лабораторных условиях.....	35
3.2	Проведение исследования в полевых условиях.....	43
4	ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДИКИ НИВЕЛИРОВАНИЯ II – III КЛАССОВ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ.....	52
4.1	Проведение исследования в лабораторных условиях.....	52
4.2	Проведение исследования в полевых условиях.....	64
5	ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ.....	78
6	ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	79
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	.81
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	82
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) РАСЧЕТ СМЕТНОЙ СТОИМОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НИВЕЛИРНЫХ РАБОТ III КЛАССА.....	83

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с развитием технологий в области геодезии и вследствие увеличения объема выполняемых геодезических работ возникла необходимость в применении современных приборов, обеспечения и создании новых методик для их выполнения. Одним из современных приборов, которым выполняется большое количество инженерно-геодезических работ, является электронный тахеометр. Удобство использования электронного тахеометра при выполнении геодезических работ является снижение общих трудозатрат при работе, возможность одновременного выполнения линейных и угловых измерений и многое другое. Одной из таких возможностей тахеометра является выполнение нивелирования с использованием наклонного луча визирования – тригонометрическое нивелирование.

Разработка методики выполнения высокоточного нивелирования с применением электронного тахеометра является одной из наиболее приоритетных задач геодезии. Возможность выполнения высокоточного нивелирования II – IV классов тригонометрическим способом открывает возможности для его использования при построении государственных сетей нивелирования, для выполнения высокоточных нивелирных работ на объектах строительства и т.п.

Целью выпускной квалификационной работы является анализ и проведение исследований по выполнению тригонометрического нивелирования II – IV классов.



# 1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ВЫСОТНОЙ СЕТКИ

## 1.1 Принципиальная схема создания высотных опорных сетей в СССР (Российской Федерации)

Нивелирной сетью называют совокупность закрепленных на местности пунктов, у которых определены их высотные отметки. Основой для определения высот в СССР (РФ) служит государственная нивелирная сеть I, II, III и IV классов [3].

До 1870 - ых гг. в России геодезисты использовали два основных способа измерения высот точек на местности: барометрический и тригонометрический. По результатам барометрического нивелирования вычислялись высоты точек для отображения на картах рельефа местности. Часть точек поверхности Земли над уровнем моря, в число которых входили астрономические пункты, определялись в начале XIX века переносными ртутными барометрами (барометр Фортена), а через некоторое время после этого - переносными металлическими барометрами (барометр Види).

Тригонометрический метод определения высот пунктов триангуляции применил в 1816 г. известный астроном и военный геодезист К.И. Теннер (1783 -1859). Им были вычислены высоты 100 пунктов сети I класса и 1225 пунктов II класса Виленской триангуляции. К.И. Теннер ввел в практику обязательное определение высот опорных пунктов этим методом. Этот метод был в то время наиболее точным и соответствовал требованиям топографов и картографов при изображении рельефа на картах штриховым способом.

В настоящее время главной высотной основой страны являются государственные сети нивелирования I и II классов,

благодаря которым устанавливается единая система высот на всей ее территории. Данные сети создаются по специально разработанным программам и схемам нивелирных работ соответствующих классов, очередность и сроки которых устанавливает Федеральная служба геодезии и картографии [3]. С помощью государственной нивелирной сети I и II классов решаются научные и практические задачи, таких как изучение фигуры и гравитационного поля Земли, хозяйственная деятельность страны, ее обороноспособность. Высотные отметки всех пунктов сети находятся методом геометрического нивелирования и определены в нормальной системе высот (Балтийская система высот), начальным (исходным) пунктом которой с 1873 года является нуль Кронштадтского футштока (средний уровень Балтийского моря) [3].

Государственная сеть нивелирования создается поэтапно, от более высокоточных сетей к менее точным, которые в свою очередь опираются на сети более высокого класса (принцип перехода от общего к частному).

Нивелирная сеть I класса является основой для всей прокладываемой сети и выполняется с наивысшей точностью с помощью высокоточного современного оборудования и действующих на момент создания методик, позволяющие уменьшить влияние различного рода ошибок на определение превышений между пунктами. Работы по созданию государственной нивелирной сети I класса производятся по специально созданной схеме и методикам, предусматривающим [3]:

- обеспечение территории страны исходными высотными пунктами, на которые в свою очередь будут опираться высотные сети II класса и ниже;

- связь с водомерными постами морей и океанов, расположенными внутри и по границам страны;
- использование наиболее удобных для нивелирования трасс (железных и шоссейных дорог);
- создание по возможности замкнутых полигонов;
- учет научных и практических требований.

Государственные сети нивелирования I класса прокладываются повторно с периодичностью 25 лет (15 лет в сейсмоактивных районах) по ранее разработанным путям, с учетом обхвата всей территории государства. Создают сети I класса в виде замкнутых полигонов периметром от 190 до 4700 км [3]. Периметр зависит от обжитости района; прокладывают сеть одновременно двойными ходами (в прямом и обратном направлениях) по двум парам костылей. Нивелирование выполняют по схеме «восьмерка», участками в 20 – 50 км. Схема «восьмерка» подразумевает прохождение половины секций участка в прямом направлении, а другой половины – в обратном, затем наоборот. Прямой и обратный хода нивелирования выполняют по одному и тому же пути прохождения, используя переходные точки одного типа. Число станций в секции при прокладывании нивелирных ходов делают четным и по возможности одинаковым [3]. Нивелирование по каждой секции в прямом и обратном направлениях выполняют в разные половины дня с целью уменьшения влияния различного рода ошибок определения высот пунктов, таких, как рефракционная ошибка.

Максимальная длина луча визирования при нивелировании I класса – 50 м. Высота луча над подстилающей поверхностью должна быть не менее 0,8 м (при длине луча до 25 м разрешается выполнять наблюдения при высоте луча не менее

0,5 м). Неравенство плеч на станции не должно превышать 0,5 м, накопление в секции – не более 1,0 м [3].

Нивелирная сеть II класса прокладывается внутри полигонов I класса, в виде отдельных линий или системы линий (полигоны) и опирается на реперы нивелирной сети I класса. Нивелирование II класса образует полигоны со средним периметром в 400 км для обжитых районов и 1000 км для малообжитых. Ходы прокладываются в прямом и обратном направлениях по одной паре костылей. Нивелирование выполняется также по схеме «восьмерка», участками в 25 - 30 км [3].

Максимальная длина луча визирования при нивелировании II класса – 75 м. Неравенство плеч на станции не должно превышать на станции 1,0 м, накопление в секции – не более 2,0 м. Высота над подстилающей поверхностью должна быть не менее 0,5 м (при длине луча визирования до 30 м разрешается выполнять нивелирование при высоте луча визирования не менее 0,3 м) [3].

Ходы I и II класса прокладывают по устойчивым грунтам для уменьшения влияния на результаты нивелирования просадки оборудования.

В соответствии с требованиями нивелирование I и II класса выполняется нивелирами Н-05, Н1, Ni-004, Ni-002 с увеличением зрительной трубы не менее 40<sup>x</sup> и ценой деления уровня не более 12", прошедшими сертификацию на соответствие требованиям данного класса прокладывания высотных сетей, и равноценными для них штриховыми инварными рейками с инварной полосой типа РН-05, имеющими две шкалы (основная и дополнительная), смещенные одна относительно другой, с расстоянием между осями штрихов 5 мм

[3]. В настоящее время вследствие развития технологий при высокоточном нивелировании наряду с оптическими нивелирами стали применяться цифровые нивелиры со штрих-кодowymi рейками.

Нивелирные сети III класса прокладываются внутри полигонов I и II классов отдельными линиями или системами линий (полигоны) с таким расчетом, чтобы разделить каждый полигон II класса на 6 – 9 полигонов. Нивелирные сети III класса создаются периметром в обжитых районах – до 150 км и до 300 км – в малообжитых. Нивелирные ходы III класса прокладывают в прямом и обратном направлении по одной паре костылей. Способ взятия отсчета при нивелировании III класса – способ «средней линии» или «способ совмещения», выполняемый уровенными нивелирами или нивелирами с компенсатором в комплекте с инварными рейками со штриховыми делениями [3]. В настоящее время все чаще нивелирование III класса выполняется цифровыми нивелирами с штрих-кодowymi рейками. Нивелирование выполняют участками в 20 – 30 км. Переход от нивелирования в прямом направлении к нивелированию в обратном направлении делают только на постоянных знаках, при этом рейки меняются местами.

Максимальная длина луча визирования при нивелировании III класса – 100 м. Неравенство плеч на станции допускается не более 2 м, накопление в секции – не более 5 м. Высота луча визирования над подстилающей поверхностью должна быть не менее 0,3 м [3].

Нивелирные сети IV класса прокладываются внутри полигонов более высокого класса, как правило полигонов III класса. Средний периметр полигона составляет 50 км. Ходы

прокладываются в одном направлении взятием отсчета способом «средней нити». При прокладывании ходов используют оптические или цифровые нивелиры типа Н-3, а также шашечные двусторонние с сантиметровыми делениями или штрих-кодовые рейки [3].

Максимальная длина визирного луча при нивелировании IV класса – 150 м. Неравенство плеч на станции допускается не более 5,0 м, накопление в секции – не более 10,0 м. Высота луча над подстилающей поверхностью должна быть не менее 0,2 м [3].

Сети или линии III и IV классов должны опираться не менее чем на два репера высшего класса.

Государственные сети нивелирования III и IV классов предназначаются для обеспечения производства топографических съемок различных масштабов, а также для решения различных инженерно-геодезических задач при проведении изысканий под строительство и реконструкцию инженерных сооружений.

Схема построения государственных сетей нивелирования представлена на рисунке 1. Основные характеристики нивелирования I, II, III и IV классов, не описанные ранее, представлены в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Основные характеристики нивелирования I, II, III и IV классов

Наименование показателя	I класс	II класс	III класс	IV класс
СКО (из обработки нивелирования), не более, мм/км	0,8	2,0	5,0	10,0
Допустимая невязка в полигонах и по линиям, мм	3 мм $\sqrt{L}$	5 мм $\sqrt{L}$	10 мм $\sqrt{L}$	20 мм $\sqrt{L}$

Нормальная длина визирного луча, м	50	65	75	100
Допустимая разность превышений по красной и черной сторонам реек (по основной и дополнительной шкалам), мм	0,5	0,7	3,0	5,0

Для разных классов нивелирования определен инструкциями и свой порядок выполнения работ на станции. Анализ основан на предписаниях к построению государственных нивелирных сетей оптическими нивелирами по действующим требованиям к их выполнению.

При нивелировании I класса в прямом направлении порядок взятия отсчетов по рейке приведен в таблице 2 [3].

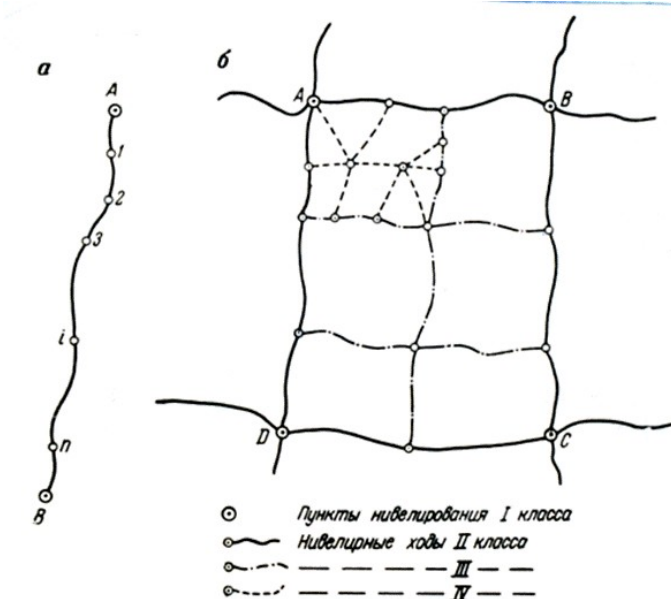


Рисунок 1 - Схема построения государственных сетей нивелирования I, II, III и IV классов в СССР (России)

Таблица 2 - Порядок наблюдений на станции нивелирования I класса

Последовательнос	Нечетная станция	Четная станция
------------------	------------------	----------------

ть взятия отсчетов		
1	Отсчет по основной шкале задней рейки $Z_0$	Отсчет по основной шкале передней рейки $P_0$
2	Отсчет по основной шкале передней рейки $P_0$	Отсчет по основной шкале задней рейки $Z_0$
3	Отсчет по дополнительной шкале передней рейки $P_d$	Отсчет по дополнительной шкале задней рейки $Z_d$
4	Отсчет по дополнительной шкале задней рейки $Z_d$	Отсчет по дополнительной шкале передней рейки $P_d$

По левой линии отсчеты производятся в той же последовательности, что и по правой. При проложении обратного хода рейки меняются местами, а измерения на нечетных станциях начинаются с передней рейки, а на четных – с задней.

Соответственно представленному порядку работы на станции при выполнении нивелирования I класса выполняется нивелирование II и III классов, при том лишь условии, что ход прокладывается по одной линии. При нивелировании III класса при наличии у нивелира с компенсатором существенной систематической ошибки компенсации рекомендуется смена порядка взятия отсчетов на четной и нечетной станции.

Нивелирные сети IV класса прокладываются в одном направлении с использованием двухсторонних шашечных реек. Порядок взятия отсчетов симметричный:  $Z_ч P_к P_ч Z_к$ , где индексы «ч» и «к» обозначают черную и красную сторону реек.

Программы наблюдений на станции государственного нивелирования симметричны во времени. Данный порядок взятия отсчетов позволяет компенсировать или свести к минимуму различные ошибки, величина которых



пропорциональна времени (ошибки за выпирание (оседание) костылей и штатива).

Кроме представленных программ нивелирования существуют и другие программы наблюдений на станции. Эти программы представлены в таблице 3 [3].

Таблица 3 – Программы нивелирования

Номер программы	Станция	Порядок работы на станции	
I	Нечетная	$(Z_o P_o P_d Z_d)^n$	$(Z_d P_d P_o Z_o)^n$
	Четная	$(P_d Z_d Z_o P_o)^n$	$(P_o Z_o Z_d P_d)^n$
II	Нечетная	$(Z_o P_o P_d Z_d)^n$	$(Z_d P_d P_o Z_o)^n$
	Четная	$(P_d Z_d Z_o P_o)^n$	$(P_o Z_o Z_d P_d)^n$
III	Нечетная	$(Z_o Z_d P_o P_d)^n$	$(Z_o Z_d P_o P_d)^n$
	Четная	$(P_o P_d Z_o Z_d)^n$	$(P_o P_d Z_o Z_d)^n$

Программа I симметрична в отношении реек и шкал, но не симметрична в отношении правой и левой нивелировок. Из анализа исследований было установлено, что программа II ввиду полной симметричности позволяет свести систематические ошибки к минимуму и достигнуть наилучших по точности результатов. Также из анализа исследований было установлено, что систематических ошибок больше при работе по несимметричной программе III, вследствие чего происходит влияние ошибок оседания системы приборов на результаты нивелирования. Но при работе на станции по программе III ввиду более быстрого взятия отсчетов средняя квадратическая ошибка оказалась ниже, чем по программе I. Из полученных данных был сделан вывод, что на станции на точность измерений превышения в большей степени влияет скорость взятия отсчетов, а при проложении многокилометровых ходов – симметричность программы наблюдений. Поэтому III

программа нивелирования подходит только при проложении коротких ходов нивелирования.

Государственная нивелирная сеть любого класса для ее сохранения на длительное время закрепляется на местности постоянными знаками – реперами. Каждый репер должен иметь свой индивидуальный номер, не повторяющийся на данной линии и по возможности на ближайших линиях нивелирования

На всех нивелирных ходах, независимо от класса точности, через 5 – 7 км (в труднодоступных районах через 10 – 15 км) закладываются рядовые реперы. Кроме того, при нивелировании I и II классов через 50 – 80 км (в сейсмоактивных районах не реже чем через 40 км) после предварительного исследования грунта бурением на глубину до 20 м закладываются фундаментальные реперы [3]. Фундаментальные реперы на значительные сроки обеспечивают сохранность высотной основы. На расстоянии от фундаментального репера закладывается репер-спутник. При нивелировании I класса закладываются вековые репера, являющиеся наиболее устойчивыми из всех видов реперов. Вековые репера позволяют обеспечить сохранность главной высотной основы на очень продолжительное время. Также они позволяют изучать вертикальные движения земной коры, колебания уровней морей и океанов. Вековыми реперами закрепляют места пересечений линий нивелирования I класса. В линии нивелирования II, III и IV классов включают временные реперы, которые обеспечивают сохранность высотной опоры в течение нескольких лет и служат основой при топографических съемках [3].

При закладке репера в грунт его называют грунтовым, в скалу – скальным, а в стену здания – стенным.

## 1.2 Способы создания высотных сетей сгущения

Высотная сеть сгущения – сеть пунктов с определенными высотными отметками, создаваемая на базе геодезической нивелирной сети более высокого порядка, при отсутствии или недостаточном количестве реперов государственной нивелирной сети для инженерно-геодезических работ и обоснования съемок в масштабе 1:5 000 – 1:500. Обычно за основу берутся нивелирные сети III и IV классов точности. Сеть сгущения прокладывают отдельными ходами, как при нивелировании II, III и IV классов, но со своими специальными требованиями [1]:

- длина хода между исходными пунктами высшего класса: 40 км для II класса, 15 км для III класса;

- длина хода между узловыми точками: 10 км для II класса, 5 км для III класса;

- средняя квадратическая погрешность среднего превышения на 1 км хода: 0,8 мм для II класса, 1,7 мм для III класса и 6,7 мм для IV класса;

- расстояние между знаками: на застроенной территории – 2 км для II класса, 0,2 км для III и IV классов; на незастроенной территории – 5 км для II класса, 0,5 - 2 км для III и IV классов.

Создают высотную сеть сгущения для обоснования топографических съемок, перенесения на район работ проекта зданий и сооружений, привязки отдельных объектов и т.п. Также сеть сгущения совмещают с пунктами планового обоснования, определяя высоты пунктов методом геометрического или тригонометрического нивелирования.

При геометрическом нивелировании ходы прокладываются между реперами и марками II, III, и IV классов нивелирования с допусками технического нивелирования.

Длины ходов между исходными пунктами должны быть не более: при высоте сечения рельефа 0,25 м – 2 км; при высоте сечения рельефа 0,5 м – 8 км; при высоте сечения рельефа 1 м и более – 16 км [1].

Точность технического нивелирования характеризуется невязкой хода, которая в зависимости от длины хода или количества станций не должна быть больше [1]:

- $\Delta h = \pm 50\sqrt{L}$  мм ( где  $L$  - длина хода);
- при числе станций более 25 на 1 км  $\Delta h = \pm 10\sqrt{n}$  мм (где  $n$  - число станций).

Высотные отметки пунктов сетей сгущения, расположенные на сильно пересеченной и горной местности, развиваемые для съемочного обоснования с высотой сечения рельефа равным 2 и 5 м, а в некоторых особых случаях и 1 м, определяют методом тригонометрического нивелирования. При этом длины ходов, в зависимости от высоты сечения рельефа, должны быть не более [1]:

- при высоте сечения рельефа 2 и 5 м – 2 км;
- при высоте сечения рельефа 1 м – 1 км.

Высотную сеть сгущения закрепляют на местности временными знаками: деревянными столбами, гвоздями и кольями, металлическими трубами. Закрепление высотной сети сгущения временными знаками соответствует назначению большинства пунктов данной сети – быть геодезической основой для решения единовременных, конкретно поставленных задач.

Пункты высотной сети сгущения закрепляются постоянными знаками в том случае если требуется или планируется их долговременное использование.

Метод создания сети сгущения выбирается и определяется исходя из технико-экономических соображений с учетом условий поставленного задания и района работ. Обычно метод тригонометрического нивелирования выгодно применять в холмистых районах с резким перепадом высот, вследствие чего удобнее определять высотные отметки пунктов с помощью наклонного луча; геометрическое нивелирование выгоднее выполнять в равнинных районах, где нет сильных перепадов высот и определение высотных отметок пунктов быстрее и удобнее производить построением горизонтального луча.

### 1.3 Виды нивелирования. Ошибки в измерениях.

Существует несколько основных видов нивелирования:

- физическое: барометрическое и гидростатическое;
- геометрическое;
- тригонометрическое;
- механическое;
- стереофотограмметрическое;
- спутниковое нивелирование;

При проведении геодезических исследований, а также для построения модели рельефа в горной и высокогорной местности, для определения высотных отметок точек местности, в некоторых случаях используют барометрическое нивелирование. Барометрическим нивелированием находится превышение между двумя точками на местности, при этом используются результаты одновременного измерения

атмосферного давления в данных точках. Атмосферное давление в каждой из точек местности в момент измерений зависит от высоты над уровнем моря и метеорологических условий [5].

Для получения превышения между выбранными точками, у одной из которых определена ее высотная отметка, измеряют в данных точках температуру и атмосферное давление.

Жидкостные (ртутные) и пружинные барометры используют для измерения атмосферного давления. Пружинные барометры также называют anerоидами.

Показания барометра-анероида отличаются от показаний ртутного барометра вследствие различия показаний атмосферного давления между ними. Для приведения измеренных anerоидом показаний атмосферного давления, необходимо внести три поправки (температурная, шкаловая и добавочную), чтобы привести данные показания к показаниям ртутного барометра. Шкаловую поправку вносят для учета нелинейности шкалы, вызываемой изменением угла между передаточными рычагами.

Барометрическое нивелирование осуществляют следующими способами [5]:

- замкнутых ходов (полигонов) с опорой и без опоры на временную барометрическую станцию;
- передвижной станции;
- скачущей станции;
- нескольких опорных станций и др.

Выбор из вышеперечисленных используемого способа зависит от объема работы, числа наблюдений, требуемой точности и наличия приборов. Точность барометрического нивелирования зависит от типа прибора, способа

нивелирования, равновесия атмосферы и других причин и равна [5]:

- при работе на небольших площадях в равнинных и холмистых районах от 0,4 до 0,5м;
- при работе в горных районах с разностью высот, большей 1 000 м, - около 3 м.

Гидростатическое нивелирование основано на свойстве жидкости в сообщающихся сосудах, т.е. в сообщающихся сосудах уровень жидкости должен быть одинаков. Нашло частое применение при выверках высокотехнологического оборудования, а также при наблюдении за осадками инженерных сооружений. Гидростатическое нивелирование успешно применяется в условиях стесненных закрытых помещений, где геометрическое нивелирование применить затруднительно или невозможно.

На практике при гидростатическом нивелировании используют стационарные и переносные гидростатические системы. Первая предназначена для наблюдений за осадками инженерных сооружений, вторая для производства выверок.

Измерение превышений производится с помощью винтового микрометра, вращением данного механизма до момента соприкосновения острия измерительного штока с поверхностью жидкости. Снятие отсчетов производится в окошке прибора, расположенном сверху. Кран служит для включения системы при ее переносе. Гидростатическая система должна быть герметизирована для исключения влияния разности давления. Для этого штуцеры должны быть соединены воздушным шлангом.

Гидростатический прибор не требует каких-либо предварительных проверок. Проверка работоспособности

системы выполняется изменением высоты одного из пьезометров – уровень жидкости в обоих сосудах должен измениться. Пьезометры закрепляются на стенные реперы; вертикальное положение пьезометров контролируется по круглому уровню.

В процессе измерений необходимо аккуратно обращаться с пьезометрами, особенно при их перевешивании, следить за состоянием шланга. Превышение между мениском жидкости в пьезометрах и шлангом по возможности должно быть минимальным. Это уменьшает влияние разницы температур в шланге на точность измерения нивелирами.

Точность гидростатического нивелирования зависит также от расстояния между сосудами, диапазона измерения превышения, типа содержимого (жидкости), конструкции отсчетного устройства и других условий. Средняя квадратическая ошибка измерения превышения лучшими гидростатическими нивелирами достигает 5 – 10 мкм; при этом диапазон измерения превышений невелик – всего около 1 см. При больших расстояниях между сосудами (до 500 м) можно измерить превышение с ошибкой около 10 мм [5].

При выполнении геометрического нивелирования необходимо наличие горизонтального луча визирования и отсчетной шкалы. Для задания в пространстве горизонтального луча визирования используется специальный геодезический прибор – нивелир. В комплекте с нивелиром всегда идет рейка, представляющая собой деревянную планку с делениями. Рейки изготавливают односторонние и двухсторонние. Последние имеют основную, черную сторону, оцифрованную от 0 мм и контрольную – красную, оцифрованную обычно от 4 687 мм или 4 700 мм. Разность отсчетов по контрольной и основной



сторонам рейки называется пяткой рейки. Данный параметр должен быть постоянен во время производства измерений (контроль взятия отсчетов).

Точность нивелирования определяет выбор того или иного вида рейки.

В свою очередь, нивелиры по точности делятся на 3 группы [5]:

- высокоточные – предназначены для нивелирования I и II классов, позволяют определять превышения со средней квадратичной погрешностью не более 0,5 – 1 мм на 1 км хода;

- точные – предназначены для нивелирования III и IV классов со средней квадратичной погрешностью не более 5 – 10 мм на 1 км хода;

- технические – предназначены для инженерно-технических работ, позволяют определять превышение с средней квадратичной погрешностью не более 10 мм на 1 км хода. Для технических работа допустимое СКП 15 – 50 мм на 1 км хода.

Нивелиры по конструкции делятся на 3 группы [5]:

- нивелиры с компенсатором;
- нивелиры с цилиндрическим уровнем;
- нивелиры с наклонным лучом визирования.

Геометрическое нивелирование выполняется двумя способами – «из середины» и «вперед». Данные способы представлены на рисунке 2 [5].

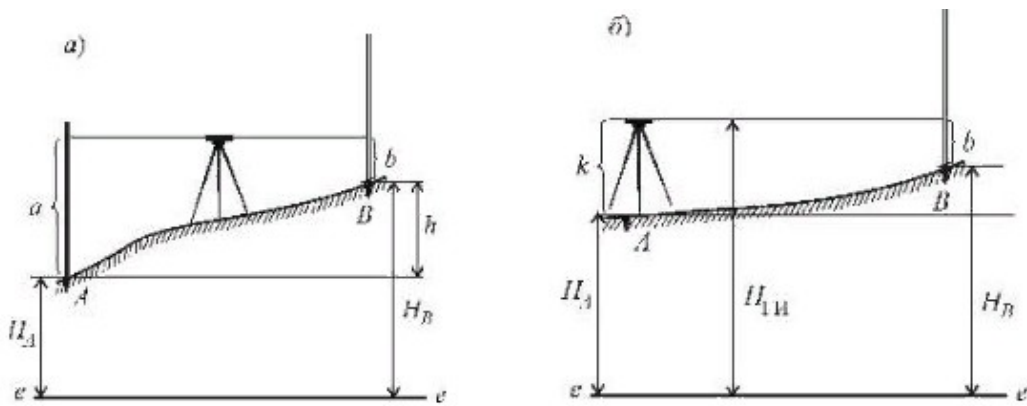


Рисунок 2 – Геометрическое нивелирование способом: а) «из середины»; б) «вперед»

Нивелирование способом «из середины» – основной способ геометрического нивелирования. Для измерения превышения точки В над точкой А нивелир устанавливается посередине между точками, визирная ось приводится в горизонтальное положение. На точках А и В устанавливают нивелирные рейки. Берется отсчет  $a$  по задней рейке и отсчет  $b$  по передней рейке. Превышение вычисляются по формуле (1) [5]:

$$h = a - b \quad (1)$$

Для контроля нахождения превышение измерения производятся дважды – по черным и красным сторонам реек. Также для повышения точности результатов определения превышения между точками нивелирование производится при нескольких горизонтах инструмента. За окончательный результат принимают среднее значение между превышениями в приемах по обеим сторонам.

При способе нивелирования «вперед» нивелир устанавливается над точкой А и измеряется (обычно с помощью

рейки) высота прибора  $k$ . В точке В, для которой требуется определить высоту, устанавливается рейка. Визирная ось нивелира приводится в горизонтальное положение, берется отсчет  $b$  по черной стороне рейки. Вычисляется превышение  $h = k - b$ , и по формуле (2) [5] находится высота точки В:

$$H_B = H_A + h \quad (2)$$

В данном способе ошибки измерений по источникам их возникновения подразделяются на:

- инструментальные;
- личные;
- за влияние внешних условий.

По признаку возникновения подразделяются на

- случайные;
- систематические.

Инструментальные ошибки (за угол  $i$  и неполную компенсацию) сводятся к минимуму путем выполнения данных условий:

- соблюдение равенства плеч;
- защита от прямых солнечных лучей;
- соблюдение определенного порядка приведения пузырька круглого уровня на середину (для нивелиров с компенсатором)
- проложение нивелирных ходов в двух направлениях и др.

К личным ошибкам наблюдателя относится ошибка округления отсчета по шашечной рейке. Установлено, что производя оценку положения нити внутри интервала рейки, глаз наблюдателя отдает предпочтение определенным десятым долям, независимо от других ошибок, влияющих на точность отсчета по рейке [6]. В настоящее время для сведения к

минимуму личных ошибок наблюдателя, стало находить широкое применение цифровых нивелиров, так как в данном случае снятие отсчета по штрих-кодовой рейке производится без участия наблюдателя.

Из ранее проведенных исследований было установлено, что на результаты нивелирования главным образом сказываются систематические ошибки, особенно вызванные влиянием внешней среды.

К ошибкам внешней среды относятся вертикальная рефракция и перемещение костылей и штатива (оседание системы).

Точность геометрического нивелирования характеризуется средней квадратической погрешностью нивелирования на 1 км двойного хода, равной от 0,5 до 10,0 мм в зависимости от класса нивелирования и типа используемых приборов [6].

Тригонометрическое нивелирование. Данный способ нивелирования подробно описан в 2 главе.

Механическое нивелирование — определение высотных отметок точек земной поверхности относительно исходной точки способом автоматического вычерчивания профиля местности и измеряемому расстоянию.

Механическое нивелирование выполняется нивелир-автоматом, который позволяет автоматически измерять расстояние по пройденному пути и вычерчивать профиль местности. Вертикаль в нивелир-автоматах задаётся тяжёлым отвесом, а расстояние по пройденному пути фиксируется фрикционным диском. Электромеханический нивелир-автомат монтируется на машине и позволяет определять не только превышение между смежными точками и расстояние между

ними на счётчиках регистрации, но и профиль местности на фотоленте.

Стереофотографический метод основан на определении превышения путем обработки пары снимков, полученных в двух точках на расстоянии базиса фотографирования таким образом, чтобы одна и та же местность была отображена на части каждого из снимков. Данный метод позволяет бесконтактным способом определять не только превышения между различными точками местности, но и другие характеристики местности. Данный вид нивелирования имеет широкое применение, так как в настоящее время аэрофотографическая съемка является основным методом картографирования территории. Точность метода зависит от масштаба снимков, точности используемых приборов, способа их обработки и др.

Под спутниковым нивелированием понимается метод получения нормальных высот точек земной поверхности по результатам обработки GPS/ГЛОНАСС - измерений с точностью, предъявляемой к геодезическим определениям нормальных высот.

Нормальная система высот, предложенная М.С. Молоденским и принятая на территории СССР в 1945 г. как вспомогательная, необходимая для приближенного определения физической поверхности Земли, далее стала широко применяться в геодезической практике. Нормальные высоты определяются по данным измерений, выполненных на физической поверхности Земли и практически не зависят от выбора эллипсоида. В тоже время они связаны с выбором начальной точки (нуль Кронштадского футштока), от которой выполняется геометрическое нивелирование. Нормальная система удобнее ортометрической тем, что не требует гипотез о

распределении масс внутри Земли, что позволяет вычислить высотную отметку достаточно точно, в зависимости от качества измерений. Нормальные высоты могут быть вычислены по геодезическим высотам или определены из результатов нивелирования.

В основе способа определения высотных отметок пунктов наблюдения с использованием спутниковых технологий лежит метод засечки положения мобильного приемника от известных положений навигационного космического аппарата.

Дифференциальный режим реализуется с помощью опорной станции (контрольный спутниковый приёмник). В этом методе по результатам наблюдений на контрольном спутниковом приёмнике формируются дифференциальные поправки к соответствующим параметрам для пункта наблюдения, т.е. наблюдения на пункте измерения и на опорном пункте обрабатываются отдельно. Данный метод обеспечивает решения в реальном времени.

В настоящее время определение относительных координат по кодовым псевдодальностям обеспечивает точность 3 – 5 м, а по фазовым измерениям может достигать средней квадратической ошибки, равной 1 мм [5].

Относительном метод наблюдения, при котором измерения, выполненные одновременно на опорном и определяемом пункте, совместно обрабатываются, исключает высокоточные мгновенные решения.

Также одним из методов спутникового нивелирования является спутниковая альтиметрия, в которой определение высотной отметки пункта определяется путем измерение высоты спутника относительно поверхности Земли по расстоянию, найденному с помощью фиксации времени

прохождения сигнала. Радиовысотомер, установленный на борту спутника, измеряет высоту мгновенного положения спутника над средним уровнем океана. Отраженный сигнал при идеальных условиях возвращается в приемник радиовысотомера путем прохождения того же кратчайшего пути.

С помощью метода спутниковой альтиметрии можно уточнить положение начала системы координат относительно центра масс Земли, параметры гравитационного поля Земли, получить уравнение геоида, то есть уточнить форму морского геоида. Точность измерений при использовании спутниковой альтиметрии ограничивается неполнотой знаний об изменении скорости распространения в различных слоях атмосферы электромагнитных волн, высокой скоростью движения спутника и параметрами горизонтального разрешения при сканировании поверхности океана. Для использования преимуществ высокой точности определения высот отметок, получаемых при использовании спутниковой альтиметрии, необходимо добиться соответствующей точности в определении орбиты спутника и степени расхождения между поверхностями геоида и океана, возмущаемой различными воздействиями. В данных измерениях поверхность геоида, исключается из результатов наблюдений как постоянная величина при наблюдениях, и фиксируется только изменения уровня океана по отношению к поверхности геоида, что позволяет судить о течениях и других процессах.

## 2 ОСНОВНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1 Технологическая схема тригонометрического нивелирования

Тригонометрическое нивелирование является одним из способов определения разностей высот между пунктами (точками) местности или сооружения. Для выполнения данного способа нивелирования раньше использовались теодолиты, которые в нынешнее время вытесняются более современными приборами – тахеометрами, обладающими конструктивными способностями наклонного визирования. В наклонном визировании заложена сущность метода, основанная на применении математического аппарата вычислений с использованием набора тригонометрических функций после выполнения линейных и угловых измерений.

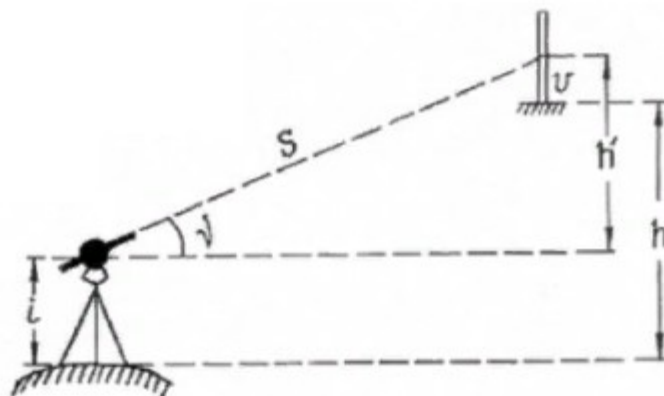
Суть данной технологии заключается в следующем. На одном из снимаемых пунктов на местности устанавливается и приводится в рабочее положение (выставление прибора точно над центром (центрирование) и приведение его в отвесное



положение (горизонтирование)) электронный тахеометр. Сразу после этого производится замер высоты инструмента (обычно обозначается символом « $i$ »). Данный параметр обозначает кратчайшее расстояние между центрами точки стояния и тахеометра (теодолита). Соответствующая запись фиксируется в полевом журнале или вводится в экран измерений электронного тахеометра.

Над второй точкой выставляется визирная цель, в виде рейки при измерениях теодолитом или вехи с маркой и отражателем при наблюдениях тахеометром. Высота визирования (обозначается символом « $v$ ») может измеряться по отсчету на рейке или рулеточным замером между центрами точки съемки и маркой с отражателем на вехе. Как правило, на фирменных вешках нанесена сантиметровая шкала для удобства определения ее высоты. Высота визирования также заносится в журналы измерений.

В дальнейшем осуществляются ориентирование на съемочной станции и измерение горизонтального, затем вертикального улов на точку съемки и наклонного расстояния ( $S$ ) с получением при необходимости горизонтального проложения ( $d$ ). Технологическая схема тригонометрического нивелирования представлена на рисунке 3 [11].



### Рисунок 3 – Технологическая схема тригонометрического нивелирования

Вычисление превышения ( $h$ ) между точками можно вычислить из равенства (3) [11]:

$$h' + i = h + v \quad (3)$$

Знаем, что  $h' = S \cdot \sin v$ . Далее имеем равенство  $h = h' + i - v$ . Отсюда имеем равенства (4) и (5) [11]:

$$h = S \cdot \sin v + i - v, \quad (4)$$

$$h = d \cdot \operatorname{tg} v + i - v, \quad (5)$$

где  $S$  – наклонное расстояние;

$d$  – горизонтальное проложение;

$\sin v$  – синус угла наклона между тахеометром и центром призмы;

$\operatorname{tg} v$  – тангенс угла наклона;

$i$  – высота инструмента;

$v$  – высота визирования (цели).

Тригонометрическое нивелирование, как правило, применяется на данный момент в основном при значительных перепадах высот местности, где геометрическое нивелирование не рекомендовано и экономически не целесообразно. В современных условиях можно выделить три наиболее встречающихся вида тригонометрического нивелирования:

– одностороннее нивелирование «вперед»;

- нивелирование «из середины»;
- двухстороннее нивелирование.

Одностороннее нивелирование «вперед». Он является наименее точным и используется в топографии. С применением точных электронных тахеометров одновременно с выполнением крупномасштабных съемок прокладывают геодезическое обоснование, с пунктов которого ведут съемочные работы. Данный метод значительно снижает временные затраты и дает значительный запас надежности для точности работ. Электронные приборы (тахеометры) в соответствии с техническими и фактическими характеристиками имеют среднеквадратические погрешности единоразового измерения горизонтального угла и отдельно вертикального не более пяти-шести секунд; для расстояний данная погрешность однократного измерения длины находится в пределах от двух до шести миллиметров в зависимости от режима съемки, цели визирования (на отражательную пленку или призменный отражатель) и расстояния до цели. Как правило, при тригонометрическом нивелировании, все измерения, измеряются дважды (в прямом и обратном направлении) и при положении трубы при двух положениях круга (КП и КЛ) При работе с электронным тахеометром измеряются:

- высоты инструмента;
- высоты визирования;
- вертикальные углы;
- длины сторон.

Метод «из середины» является очень похожим по технологии исполнения на соответственный ему способ геометрического нивелирования. Сам геодезический прибор

(тахеометр) устанавливается ориентировочно посередине (соблюдения равенства плеч) между точками наблюдения в зависимости от расстояния между ними.

В качестве визирных целей могут использоваться различные инструменты:

- рейки, при небольших расстояниях между прибором и пунктами съемки;
- вешки с марками и призменными отражателями на них;
- штативы с установкой на них трегеров с оптическими центрами и маркой с призмой.

При использовании реек визирование прибора может осуществляться на ее шкалу. Схема тригонометрического нивелирования способом «из середины» с использованием реек представлена на рисунке 4 [11]. Визирование возможно также и на самоклеющуюся отражательную пленку, с постоянной высотой визирования, определенной заранее. При наклеивании нескольких пленок на разной высоте рейки высота цели при съемке будет переменной в зависимости от рельефа местности и видимости.

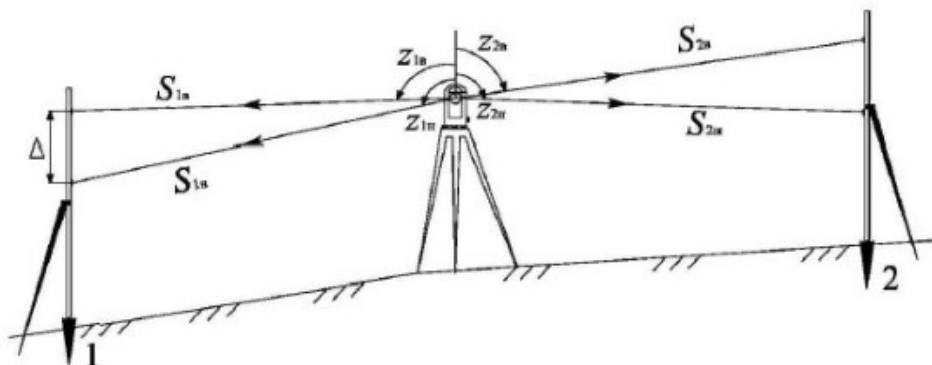


Рисунок 4 – Тригонометрическое нивелирование из середины с рейками

Вешки, применяемые при нивелировании, с размещенными на них визирными марками с отражательными призмами, рекомендуется удерживать в специально приготовленных для этого биподах, триподах – так называемых штативах с двумя и соответственно тремя ножками. Схема тригонометрического нивелирования способом «из середины» с использованием вех представлена на рисунке 5 [11].

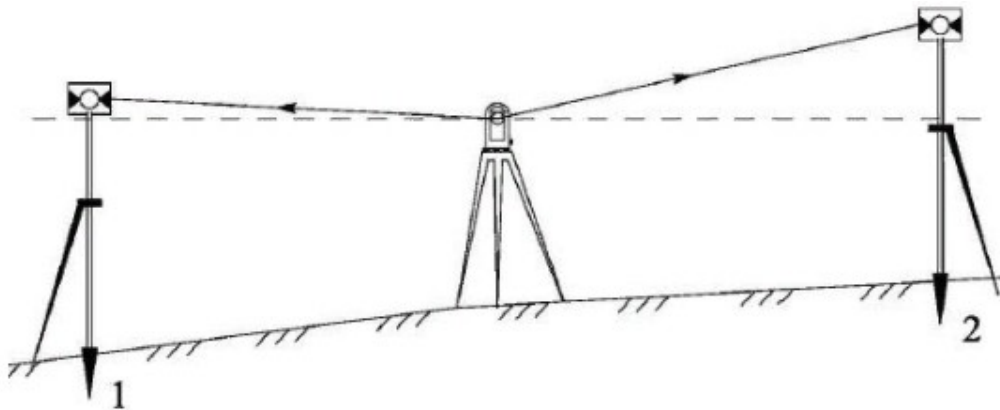


Рисунок 5 – Тригонометрическое нивелирование из середины с вешками

Еще одним вариантом прокладывания тригонометрических ходов методом «из середины» является способ трех штативов. Суть данной системы заключается в следующем. По направлению движения нивелировки устанавливаются сначала задний штатив, на который устанавливается трегер с оптическим отвесом. В него с помощью адаптера могут вставляться марки с призмами или марки с приклеенными на них отражательными пленками. На второй штатив устанавливается электронный тахеометр. И на передний (третий) штатив крепится вторая сигнальная марка с отражателем в трегер. Выполняются все требующиеся измерения углов и расстояний. Далее осуществляется переход

на пункт за передним штативом, причем переносится только задний штатив; штативы с прибором и передней маркой остаются на месте, снимаются и переносятся прибор и марка. На каждом штативе последовательность должна быть установлены в таком порядке [11]:

- на заднем штативе призма с маркой;
- на среднем электронный тахеометр;
- на переднем также марка с отражательной призмой.

Схема тригонометрического нивелирования способом «из середины» с использованием трех штативов представлена на рисунке 6 [11].

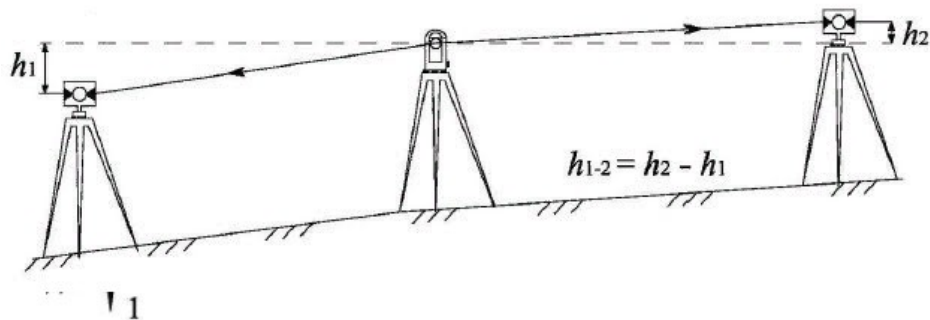


Рисунок 6 – Тригонометрическое нивелирование из середины по штативной системе

При определении осадок и деформаций сооружений и оборудования, перемещения по вертикали осадочных марок тригонометрическим нивелированием способом «из середины» уделяется особое внимание влиянию на результаты нивелирования перемещения системы «штатив – тахеометр».

Тригонометрическое нивелирование при одном горизонте тахеометра наблюдения на станции может производиться по следующим трем программам [8]:

- первая программа: наблюдение по программе  $Z_{\text{кл}}$ ,  $P_{\text{кл}}$ ,  $P_{\text{кп}}$ ,  $Z_{\text{кп}}$ ;
- вторая программа: наблюдение по программе  $Z_{\text{кл}}$ ,  $P_{\text{кл}}$ ,  $Z_{\text{кп}}$ ,  $P_{\text{кп}}$ ;
- третья программа: наблюдения по программе  $Z_{\text{кл}}$ ,  $Z_{\text{кп}}$ ,  $P_{\text{кл}}$ ,  $P_{\text{кп}}$ .

Первая программа наблюдений при тригонометрическом нивелировании удобна тем, что, выполняя и измерения по данной методике полным приемом, можно устранить влияние оседания системы «штатив – тахеометр» на результаты нивелирования. Справедливо данное утверждение и в случае, если начинать производить измерения с первоначальным наведением на переднюю рейку (отражательный элемент).

При выполнении нивелирования по второй и третьей программам наблюдений вычисленное превышение будет отягощено величиной оседания системы «штатив – тахеометр».

Из трех предложенных программ наблюдений при одном полном приеме измерений следует, что компенсация величины оседания системы «штатив – тахеометр» происходит при применении первой программы.

Для повышения точности и надежности измерений превышения на станции необходимо увеличивать число измерений (приемов измерений). Их увеличение возможно путем увеличения числа горизонтов на станции или увеличения числа ходов (прямо и обратно). Применительно к ослаблению влияния оседания системы «штатив – тахеометр» на станции необходимо выбрать программу наблюдений с таким расчетом, чтобы она стала симметричной.

Двухстороннее тригонометрическое нивелирование можно разделить на одновременное и неодновременное его

исполнение. Одновременное нивелирование подразумевает под собой проведение измерений двумя приборами синхронно с привлечением соответственно и двух исполнителей работ. Неодновременный двухсторонний метод заключается в геодезических измерениях с перестановкой тахеометра на пунктах наблюдения в такой же последовательности, как и при трех штативном способе. При этом он состоит как бы из двух односторонних ходов с измерениями «вперед» и «назад».

## 2.2 Основные источники ошибок тригонометрического нивелирования

Основными источниками ошибок тригонометрического нивелирования являются ошибки [8]:

- вызванные влиянием внешних факторов (например, вибрация);

- инструментальные ошибки: влияние вертикальной рефракции, тепловое воздействие на нивелир, приводящее к изменению МО;

- ошибки, связанные с взятием отсчёта по рейкам (неточным наведением на марку или пересечение сетки нитей отражателя).

Влияние вибрации на систему «штатив – тахеометр» также приводит к непрерывному нарушению положения равновесия компенсатора при вертикальном круге. Одновременно под действием горизонтальной составляющей вибрации зрительная труба тахеометра совместно с верхней частью тахеометра (алидадой) начинает совершать непрерывные колебания в горизонтальной плоскости относительно лимба. Вследствие этого наведение сетки нитей на визирную цель также, как и при



нивелировании, во-первых, становится затруднительных, и, во-вторых, нарушается работа угловых преобразователей горизонтальных и вертикальных кругов кодового или накопительного типов. Исследования [8], проводившиеся для выявления численных значений влияния вибрации на результаты тригонометрического нивелирования, показали, что ошибка измерения расстояний может достигать нескольких сантиметров. Это во многом касается тригонометрического нивелирования в безотражательном режиме (падающий на отражающую поверхность луч ввиду вибрации может отразиться от другой поверхности). Использование амортизационных подкладок позволяет до 30 - 40 % уменьшить влияние на угол наклона, а так же на 70 - 80 % уменьшить влияние на ошибку измерения расстояний (хотя на величину ошибки измерения расстояния влияет и сама величина расстояния (следует выполнять нивелирование короткими (до 100м) лучами)) [8]. Также очень важно найти центр источника вибрации. В этом случае перемещение штатива на небольшое (0,5 - 1,0 м) расстояние может увеличить или уменьшить влияние вибрации даже с применением подкладок [8].

Под влиянием изменения температуры воздуха происходит изменение значения МО вертикального круга. Значение МО определяется и вводится перед началом производства нивелирных работ. Однако при выполнении нивелирования данное значение непрерывно изменяется. На основе исследований было установлено, что влияние МО можно устранить при выполнении тригонометрического нивелирования при двух горизонтах прибора, а также при симметричной системе взятия отсчетов. Влияние МО на результаты нивелирования очень значительные (особенно это

влияние увеличивается с увеличением расстояния от прибора до цели). И если при выполнении нивелирования технической точности данное изменение не играет роли, то при высокоточном нивелировании оно будет существенным.

При тригонометрическом нивелировании при взятии отсчетов необходимо учитывать преломление световых волн, проходящих слои атмосферы различной плотности, что в итоге дает искажение изображения, что в свою очередь дает ошибку во взятиях отсчета на визирную цель. Данную ошибку называют рефракционной ошибкой – проекция пространственной рефракционной кривой на вертикальную плоскость.

К основным факторам внешней среды, влияющим на значение рефракционной составляющей, относят следующие факторы [6]:

- структура и тип подстилающей поверхности;
- географическое положение района измерений;
- тип и балл облачности;
- направление и скорость ветра;
- турбулентные характеристики приземного слоя атмосферы.

- наличие и вид осадков;

Односторонне измеренные превышения искажаются систематической рефракционной ошибкой величиной в несколько раз больше, чем компенсация рефракционных ошибок в способе «из середины» или в двустороннем нивелировании [7]. Нивелирование способом «из середины» нередко позволяет получить более надежные результаты, чем при введении поправок в результаты одностороннего нивелирования. С учетом влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими

лучами в приземном слое атмосферы были созданы рекомендации при выполнении измерений, исходя из всех данных и указаний, полученных путем проведения исследований в данной области. Более подробно о влиянии рефракции на результаты измерений и способах уменьшения ошибок при ее участии описано в разделе 3.

### 3      ОБОСНОВАНИЕ      И      ВЫБОР      МЕТОДИКИ НИВЕЛИРОВАНИЯ      III      -      IV      КЛАССОВ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

#### 3.1      Проведение      исследования      в      лабораторных условиях

С целью выбора и обоснования методики нивелирования III - IV классов была проведена работа с научной литературой по данной теме. Это было сделано для выявления необходимых параметров и ошибок, которые необходимо учитывать при выполнении тригонометрического нивелирования.

Оценка влияния различного рода ошибок необходимо выполнить в два этапа:

- в лабораторных условиях;
- в полевых условиях.

Лабораторные исследования [6] выполнялись следующим образом. В связи с тем, что при выполнении измерений в лабораторных условиях влияние внешних условий минимально, то тем самым позволит определить инструментальную точность прибора с большей достоверностью.

Перед выполнением исследования в лабораторных условиях было необходимо привести прибор в рабочее положение, а именно:

- установить ножки штатива в удобное для съемки положение, обеспечить их устойчивость, надежно закрутить винты (зафиксировать штатив);

- закрепить надежно прибор винтом к штативу;

- привести электронный уровень в нульпункт (круглый уровень для приведения тахеометра не используется, так не обеспечивает достаточной точности для проведения исследования);

- свести ошибку влияния МО на результаты исследования к минимуму путем проведения поверки прибора на МО.

В качестве источника определения инструментальной точности прибора были взяты данные из исследования, проведенного ранее специалистами в данной области.

Исследование выполнялось с помощью электронного тахеометра Leica TCR-802 ( $m_\alpha = 2,0''$ ,  $m_S = 2,0$  мм). Внешний вид прибора представлен на рисунке 7 [2].



Рисунок 7 – Электронный тахеометр Leica TCR-802

Технические характеристики прибора Leica TCR-802 приведены в таблице 4 [2].

Таблица 4 - Характеристики ЭТ Leica TCR-802

Характеристика	Значение
Увеличение зрительной трубы	30х
Минимальное расстояние	1,7 м
Сетка нитей	С подстветкой
Диапазон работы компенсатора	$\pm 4'$
Точность установки компенсатора	2"
Измерение до призмы GPR1 (Leica)	3500 м (1 призма)/ 5400 м (3 призмы)/7000 м (длинный базис)
Измерение на катафот (60 мм x 60 мм)	400 м
Точность (точно/быстро/слежение)	2 мм + 2 ppm/ 5 мм + 2 ppm/ 5 мм + 3 ppm

*Продолжение таблицы 4*

Характеристика	Значение
Безотражательные измерения	400 м
Точность (быстро/слежение)	3 мм + 2 ppm/ 5 мм + 2 ppm
Время измерений (быстро/слежение)	(3с + 1с/ 10 м)/ (1с + 0.3 с/ 10 м)
Время измерения (точно/быстро/слежение)	< 1 с / < 0,5 с / < 0,3 с
Внутренняя память	15 000 блоков данных
Формат данных	GSI / IDEX / ASCII / Легко настраиваемый пользовательский формат
Дисплей	Буквенно-цифровой
Клавиатура	полноценная клавиатура; возможность установки второй клавиатуры
Рабочий диапазон температур	от минус 20°C до плюс 50°C
Пыле-, влагозащита (IEC529)	IP54
Диапазон температур при хранении	от минус 40°C до плюс 70°C
Длина x ширина x высота	151мм x 203мм x 316мм
Вес (прибор/аккумулятор/штатив)	4,2 кг / 0,2 кг / 0,6 кг
Тип аккумулятора	NiMH / камкодер
Напряжение / ёмкость	6 В /3600 мАч;

Внешнее питание	через кабель (11,5...14 В)
Период работы GEB121	около 6 часов

Тахеометром, установленным на штативе, производилось нивелирование на стандартный отражатель Leica, закрепленным на вехе, которая была неподвижно установлена в штативе на распорках. Так же внимательно производилось наблюдение за тем, чтобы пузырек уровня располагался в нульпункте.

Измерения производились с двух положений прибора - на расстоянии 50 и 100 метров от отражателя. Для повышения точности измерений изменялась не высота прибора, а отражателя, на величину 40 - 50 мм. Данное изменение высоты отражателя отслеживалось штангенциркулем с погрешностью 0,10 мм, внешний вид которого представлен на рисунке 8 [6]. Данная величина превышения, измеренная штангенциркулем, принималась за эталонную.

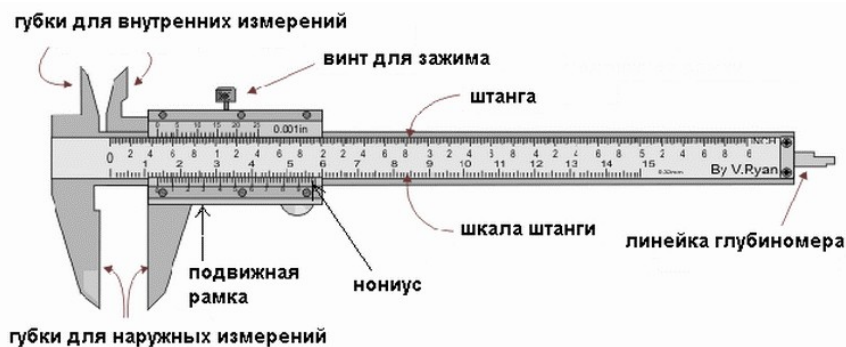


Рисунок 8 – Внешний вид штангенциркуля

Схема фиксирования изменения положения отражателя с помощью штангенциркуля представлена на рисунке 9 [6].

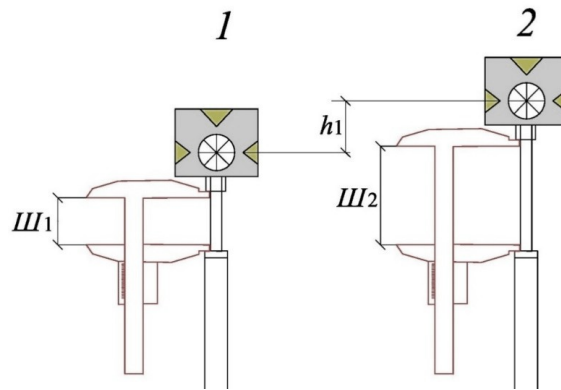


Рисунок 9 – Схема измерения превышения штангенциркулем

Каждый цикл измерений (для каждого расстояния) состоял из 10 серий измерений. На каждом положении отражателя, фиксируемое штангенциркулем ( $Ш_1, Ш_2, \dots, Ш_{10}$ ) было произведено по 15 измерений.

Разность в высотном положении между горизонтальной осью вращения трубы ЭТ и осью вращения призмы отражателя (превышение) находилось по формуле (6) [6]:

$$h_i = S_i \sin \alpha_i, \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  – угол наклона, полученный как среднее из значений при КЛ и КП;

$i$  – номер приема.

СКО измерения угла наклона определялась по формуле Бесселя, а ошибка самой ошибки по формуле Гаусса (7) [6]:

$$m_m = \frac{m}{\sqrt{2r}}, \quad (7)$$

где  $r$  – число избыточных измерений.

На точность определения превышения ошибка измерений расстояния практически не влияет в случае, если угол наклона менее  $1^\circ$ . Исходя из этого, ошибка превышения  $m_h$  между осью вращения трубы и отражателем (визирной целью) фактически равно ошибке измерения угла в линейной мере.

Результаты произведённых оценок точности измерения превышений и углов наклона представлены в таблице 5 [6].

Таблица 5 – Результаты оценки точности измерений для расстояний 50 – 100 м

Номер р	S = 50 м				S = 100 м			
	$m_\alpha$	$\pm m_m$	$\gamma_1 m \leq \sigma \leq$	$m_h,$	$m_\alpha$	$\pm m_m$	$\gamma_1 m \leq \sigma \leq m$	$m_h,$
1	1,3	0,25'	$0,95 \leq \sigma \leq$	0,32	0,99'	0,19'	$0,71 \leq \sigma \leq$	0,48
2	0,8	0,16'	$0,63 \leq \sigma \leq$	0,21	1,19'	0,23'	$0,86 \leq \sigma \leq$	0,58
3	0,6	0,12'	$0,46 \leq \sigma \leq$	0,15	0,65'	0,12'	$0,47 \leq \sigma \leq$	0,32
4	1,1	0,22'	$0,85 \leq \sigma \leq$	0,28	0,83'	0,16'	$0,60 \leq \sigma \leq$	0,40
5	2,4	0,46'	$1,74 \leq \sigma \leq$	0,58	0,95'	0,18'	$0,68 \leq \sigma \leq$	0,46
6	0,9	0,17'	$0,66 \leq \sigma \leq$	0,22	1,02'	0,19'	$0,74 \leq \sigma \leq$	0,49
7	1,4	0,28'	$1,06 \leq \sigma \leq$	0,35	1,08'	0,20'	$0,78 \leq \sigma \leq$	0,52
8	1,1	0,21'	$0,82 \leq \sigma \leq$	0,27	1,25'	0,24'	$0,56 \leq \sigma \leq$	0,60
9	1,0	0,20'	$0,78 \leq \sigma \leq$	0,26	0,77'	0,15'	$0,77 \leq \sigma \leq$	0,37
10	0,9	0,18'	$0,68 \leq \sigma \leq$	0,23	1,34'	0,25'	$0,97 \leq \sigma \leq$	0,65
Ср.	1,2	-	$0,86 \leq \sigma \leq$	0,29	1,01'	-	$0,71 \leq \sigma \leq$	0,49

Из данных таблицы можно сделать вывод, что СКО угла наклона, измеренного одним приемом в лабораторных условиях, не превышает в основном  $1,5''$ .

Так как количество приемов в серии менее 20, то для повышения надежности вычисляются также доверительные интервалы теоретической СКО (стандарт  $\sigma$ ), используя распределение  $\chi^2$  (см. таблицу 5). Была установлена



закономерность, сущность которой состоит в том, что фактическая точность измерения угла наклона на отражатель в большинстве случаев соответствует паспортной точности ЭТ.

В результате оценки «по внутренней сходимости» были приведены характеристики  $m_\alpha$ . Но подобная оценка не соответствует критериям для получения достоверных выводов. Для подтверждения результатов «по внутренней сходимости» необходимо сравнить превышения, полученные с помощью ЭТ и штангенциркуля. Для этого находятся средние значения превышений в каждой из серий по формуле (8) [6]:

$$h_{\text{cp}}^j = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_{15}}{15} . \quad (8)$$

Было найдено девять превышений для смежных положений отражателя на вехе, которые находились по формуле (9) [6]:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= h_{\text{cp}}^2 - h_{\text{cp}}^1 \\ h_n &= h_{\text{cp}}^{j+1} - h_{\text{cp}}^j \\ h_9 &= h_{\text{cp}}^{10} - h_{\text{cp}}^9 \end{aligned} \right\} . \quad (9)$$

В качестве эталонных превышений ( $h^9$ ) принимались значения превышений, найденные с помощью штангенциркуля по формуле (10) [6]:

$$\left. \begin{aligned} h_1^{\text{э}} &= \text{Ш}^2 - \text{Ш}^1 \\ h_n^{\text{э}} &= \text{Ш}^{j+1} - \text{Ш}^j \\ h_9^{\text{э}} &= \text{Ш}^{10} - \text{Ш}^9 \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где  $\text{Ш}^j$  – отсчет по шкале штангенциркуля для  $j$ -го положения отражателя.

В конце находились разности  $\Delta$  между превышениями, полученными ЭТ и соответствующими им эталонные значения, полученные с помощью штангенциркуля.

Результаты нахождения разностей представлены в таблице 6 [6]. Следует упомянуть, что результаты полученных разностей  $\Delta$  зависят от точности произведенных измерений обоими приборами (ЭТ и штангенциркуль).

Таблица 6 – Контрольные разности  $\Delta$

Номер разности	Разность $\Delta$ , мм, при расстоянии до цели	
	$S = 50$ м	$S = 100$ м
1	2	3
1	+0,37	+0,26
2	-0,34	+0,07
3	+0,10	+0,52
4	+0,46	+0,30
5	+0,07	+0,24
6	+0,34	-0,41
7	-0,33	+0,46
8	+0,57	-0,32
9	-0,10	+0,01

Для правильной оценки данных разностей  $\Delta$ , в исследовании была также произведено нахождение их СКО и предельных ошибок.

В итоге, для расстояния в 100 м ошибка однократного измерения превышения ЭТ равняется  $m_{hi} = 0,23$  мм,  $\Delta_{пред} = 0,69$  мм; для 50 м соответствующие значения равны  $m_{hi} = 0,30$  мм,  $\Delta_{пред} = 0,54$  мм [6]. При сравнении данных предельных значений с разностями превышений  $\Delta$  из таблицы 6, можно сделать вывод, что величины разностей превышений  $\Delta$  не превосходят предельные значения. Сравнение значений превышений, полученных ЭТ и штангенциркулем, дают объективную оценку «внутренней сходимости».

Так же в исследовании [6] после оценки «внутренней сходимости» проводилась статистическая обработка опытных данных, суть которой заключалась в том, что предлагалась методика измерения превышения, состоящая из двух полных приемов для измерения угла наклона и расстояния в каждой из десяти серий; из полученных данных составлялись парные комбинации измерений и находились средние значения превышений для каждой пары полных приемов. Всего таких пар в десяти сериях оказалось 1 050 (105 пар в каждой серии).

Для оценки данного метода были найдены разности с наиболее вероятным соответствующим значением  $h_{cp}$  ( $\Delta' = |h_{пар}| - |h_{cp}|$ ).

Полученные значения для каждого расстояния были разбиты по интервалам. Из полученных данных был сделан вывод, что в 98,8 % случаев превышение, полученное как среднее из двух приемов, не отличается от  $h_{cp}$  не больше, чем на  $\pm 0,80$  мм [6].

Имея ошибку измерения превышения, равную 0,80 мм (при  $S = 100$  м), получаем, что СКО на станции равна (11) [6]:

$$m_{cm} = 0,80 \times \sqrt{2} = 1,13 \text{ мм} \quad (11)$$

а на 1 км хода имеем (12) [6]:

$$m_{км} = 1,13 \times \sqrt{5} = 2,53 \text{ мм} \quad (12)$$

Найденное значение СКО на 1 км хода, равное 2,53 мм, отвечает критериям точности геометрического нивелирования III класса.

Используя все данные, полученные в исследовании, можно предложить методику измерения превышения тригонометрическим способом, заключающаяся в том, что для длин линий визирования до 100 м, достаточно производить измерения двумя полными приемами с полным приведением прибора в рабочее положение и поверкой МО. Но исследование в лабораторных условиях, как было сказано ранее, сводит к минимуму ошибки от влияния внешних условий (как, например, вертикальная рефракция, которая оказывает существенное влияние на точность измерений в полевых условиях), и поэтому необходимо производить соответствующее исследование в условиях открытой местности.

### 3.2 Проведение исследования в полевых условиях

После проведения этапа исследования в лабораторных условиях, необходимо провести измерения по методике,

разработанной ранее, в полевых условиях, с внесением поправок за влияние внешних условий.

При проведении исследования в полевых условиях, значительные искажения в результаты измерений углов вносит вертикальная рефракция (проекция рефракционной кривой (искривление траектории распространения световых волн) на вертикальную плоскость).

В свою очередь рефракционная ошибка подразделяется на две составляющие [7]:

- короткопериодическая, вызванная вследствие случайного процесса в атмосфере (турбулентное движение воздуха). Результатом являются нечеткое изображение цели, что снижает точность наведения, а это в свою очередь понижает точность измерения угла наклона;

- регулярная составляющая, которая не влияет на изображение цели и является медленно протекающих процессов распределения температуры в атмосфере с высотой (стратификация атмосферы).

Регулярная составляющая является систематической ошибкой, поправку за которую вносят в результаты измерений по формуле (13) [6]:

$$r = \frac{d^{\text{км}}}{2R^{\text{км}} \cos^2 \alpha} d \cdot k, \quad (13)$$

где  $R^{\text{км}}$  – средний радиус Земли (6371 км);

$k$  – коэффициент рефракции;

$h^{\text{км}}$  – разность высот горизонтальной оси вращения зрительной трубы и цели.

Для нахождения коэффициента вертикальной рефракции существует несколько способов, подразделяющиеся на две группы [7]:

- инструментальные (геодезический, дисперсионный, компенсационный и др.);
- расчетные (основаны на зависимости рефракции от метеорологических величин).

Из предложенных способов в исследовании был использован метеорологический метод [4], основанный на измерении температуры окружающей среды посредством приборов, фиксирующих температуру, и расположенных на разной высоте от уровня земли возле прибора и возле цели. Но данный метод не может в полной мере дать оценку влияния рефракционной ошибки на всю длину луча, так как температурные данные с двух точек, вследствие пульсации температуры в турбулентном слое атмосферы (изменения в  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  через  $0,1\text{ с}$ ), не дают точных значений распределения и количественного показателя температурного градиента по всей длине.

Изучение влияния температурного градиента для коротких линий дает большую точность реального состояния температурного поля. Для линий менее  $100\text{ м}$  было установлено, что влияние рефракционной ошибки сравнительно мало (рисунок 10) [4]. Но прокладывание ходов менее  $100\text{ м}$  нецелесообразно в плане трудоемкости, а для линий  $100 - 300\text{ метров}$  не практично и экономично вследствие необходимости более точного определения температурного поля.

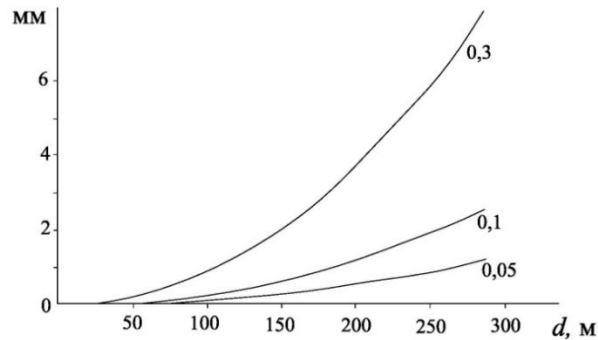


Рисунок 10 – График СКО определения поправок за рефракцию по градиентным измерениям в ходах двустороннего нивелирования

Для снижения влияния рефракционной ошибки, предлагается использовать способ нивелирования из середины или двухстороннее нивелирование, которое позволяет на порядок сократить влияние рефракции на результаты измерения. Так в предыдущих работах, посвящённых данной тематике, было установлено, что в одностороннем нивелировании систематическая ошибка за счет влияния рефракции, на порядок выше. Внесение поправок в измеренные превышения, полученных из результатов метеонаблюдений, позволяют еще точнее производить измерения. Так же повышало точность измерений и скорость проведения работ, время между сериями измерений старались сделать как можно меньше.

Кроме внесения поправок, было установлено, что время суток, года и погодные условия влияют на точность определения коэффициента рефракции. Наиболее приемлемая погода для проведения измерений – пасмурная без дождя и ветра. В ясную погоду наиболее благоприятное время считается

с 14 до 16 ч. В пасмурную погоду, с 10 до 18 ч, точность определения в три раза выше, чем ясную погоду [4].

На практике, для внесения поправок за рефракцию, используют значение коэффициента рефракции, равное  $k = 0,14$  [4]. Исследования, направленные на определение коэффициента рефракции, проводились еще в XVIII-XIX вв.; тогда же учеными были получены результаты коэффициента рефракционной ошибки, лишь немного отличающиеся от данных, используемых сейчас. И в дальнейших исследованиях также были выработаны факторы, влияющие на увеличение влияния рефракции на результаты измерений, и были выработаны методики для уменьшения влияния данной ошибки.

После, приняв во внимание исследование [6] о влиянии рефракционной ошибки на результаты измерений, принялось положение, что измеренные превышения на станции в большинстве свободны от влияния регулярной составляющей рефракции, так как количество времени, затраченное на серию измерений, не превышало 15 минут, что в свою очередь давало одинаковые условия для прохождения визирного луча при разных положениях отражателя.

Для проведения исследований в полевых условиях был выбран электронный тахеометр Leica TS-06 ( $m_\alpha = 2,0''$ ,  $m_s = 1,50$  мм), представленный на рисунке 11 [2]; расстояния до отражателя принимались от 50 до 300 м.





Рисунок 11 – Тахеометр Leica TS-06

Технические характеристики прибора представлены в таблице 7 [2].

Таблица 7 – Технические характеристики тахеометр Leica TS-06

Характеристика	Значение
Увеличение зрительной трубы	30х
Дальность измерения на призму	1,3 – 3500 м
Безотражательный режим	0,3 – 500 м
Дисплей	LCD
Подсветка	Дисплей, сетка нитей, клавиатура
Внутренняя память	100 000 точек
Карта памяти	USB флэш карта
Порты передачи данных	RS-232C, USB, Bluetooth
Время работы	До 20 часов от одного аккумулятора
Время заряда одного аккумулятора	До 4 часов
Вес прибора	5,2 кг
Температурный диапазон работы	от минус 35 °С до плюс 50 °С
Защита от пыли и влаги	IP55

Формат данных	GSI / IDEX / ASCII / Легко настраиваемый пользовательский формат
---------------	--

В качестве отражателя был выбран отражатель фирмы Sokkia, который закреплен на вехе; веха установлена по круглому уровню на точке со стабильным положением и закреплена специально изготовленным кронштейном, установленном на распорках.

Исследование [6] проводилось на двух разных типах подстилающей поверхности (песок и глина; грунт, поросший травой) в летний период времени. В журнале наблюдений записывались погодные условия на время проведения измерений. Как и в методике проведения измерений в лабораторных условиях, измерения включали в себя измерения углов наклона и расстояний (длины лучей визирования от 50 до 300 м); в каждой серии измерений выполнялось по 15 приемов в каждой из серий. Было выполнено шесть серий измерений. После выполнения измерений, на основе полученных углов наклона, измеренных одним полным приемом, были представлены СКО угловых измерений. Среднее значение составило  $m_\alpha = 1,3''$ . С доверительной вероятностью 0,95 средняя квадратическая ошибка измерения угла наклона одним полным приемом будет находиться в интервале (14) [6]:

$$0,94 \leq \sigma \leq 2,10. \quad (14)$$

Для углов наклона меньше  $1^\circ$  принимают ошибку измерения превышения  $m_h$  равной ошибке измерения угла  $m_\alpha$  в линейной мере.

Характеристики  $m_h$  и  $m_\alpha$ , полученные в результате оценки «по внутренней сходимости», заносят в таблицу. Для получения более точной оценки качества выполнения измерений, сравнивают превышения, полученные электронным тахеометром и штангенциркулем, которым фиксировалось изменение положения отражателя на вехе между сериями измерений. Полученные результаты оценки точности превышений представлены в таблице 8 [6].

Таблица 8 – Результаты оценки точности превышений

S, м	$m_h$ , мм	$m_m$ , мм	$\gamma_1 m \leq \sigma \leq m \gamma_2$
50	0,25	0,05	$0,18 \leq \sigma \leq 0,40$
100	0,86	0,16	$0,62 \leq \sigma \leq 1,39$
120	0,65	0,12	$0,47 \leq \sigma \leq 1,05$
200	1,28	0,24	$0,92 \leq \sigma \leq 2,07$
300	2,01	0,38	$1,45 \leq \sigma \leq 3,25$

Для разностей  $\Delta$ , найденных из разностей превышений, полученных ЭТ и штангенциркулем (эталонные превышения), находились их СКО и был осуществлён переход к предельным ошибкам. Данные разностей  $\Delta$  и соответствующих предельных значений представлены в таблице 9 [6].

Таблица 9 – Контрольные разности  $\Delta$

Номер разности	Разности $\Delta$ , мм, при расстоянии до цели				
	S = 50 м	S = 100 м	S = 120 м	S = 200 м	S = 300 м
1	-0,67	+0,08	+0,46	+1,31	-0,45
2	+0,15	+0,18	+1,22	-0,91	-0,01
3	-0,21	-0,20	-0,72	-1,67	+0,30
4	+0,07	+0,28	-0,84	+0,52	-1,63

5	-0,22	-	-	-1,14	-0,22
Дпред, мм	$\pm 0,50$	$\pm 1,03$	$\pm 0,83$	$\pm 1,46$	$\pm 2,24$

Из данных таблицы был сделан вывод, что лишь малое количество значений превосходит допуски. Вследствие того, что встречаются разности как положительные, так и отрицательные, был сделан вывод о случайном характере распределения ошибок.

Также составлялась таблица максимальных расхождений по модулю между превышениями (в одной серии), из которой следовало, что часть значений выходило за пределы ожидаемого интервала  $\Delta = 4''$  (при  $m_\alpha = 2,0''$ ,  $p = 0,95$ ). Это позволило сделать вывод, что эти расхождения вызваны вследствие непостоянства коэффициента рефракции в процессе выполнения измерений (15 приемов); влияло качество изображение цели (до 150 м четкое, без заметных колебаний; при расстоянии в 250 – 300 м влияние короткопериодической составляющей более существенное, проявляемое в размытости изображения и колебаниях) [6]. Существенное влияние на это также оказывало Солнце, освещающее подстилающую поверхность, что увеличивает диапазон измеренных превышений. При пасмурной погоде изображение более четкое, вследствие чего ошибка измерений была заметно снижена ( $m_\alpha = 0,68''$ ,  $h_{max} - h_{min} = 3,2$  мм) [6].

После оценки результатов «по внутренней сходимости», была проведена оценка методом статистической обработки опытных данных. Предполагалось, что измерения проводились двумя полными приемами в каждой из шести серий. Составлялись все парные комбинации превышений и находились их средние значения. Всего получилось 630 пар (по

105 в серии). Средние значения превышений в каждой серии, полученные по формуле (8), принимались за истинные.

Для расстояний до 200 м полученные разности, распределенные по интервалам, заносились в таблицу. Из полученных данных был сделан вывод, что превышения, полученные как среднее из двух приемов, не отличаются от истинного в 98 % случаев не более, чем на  $\pm 2,0$  мм [6].

По аналогичные данные для расстояний до 300 метров, где углы наклона не превышали  $2^\circ$ , был сделан вывод, что в 88 % случаев превышения, полученные как среднее из двух приемов, не отличаются от истинного более чем на  $\pm 2,0$  мм [6]. Эти выводы справедливы и для холмистой местности ( $\alpha \leq 15^\circ$ ), так как ошибка измерения углов, как главная фактор ошибки измерения превышения, для углов наклона в  $2^\circ$  и  $15^\circ$  с одинаковой точностью измеряется ЭТ. Это следует из того, что инструментальная точность измерения углов наклона не зависит от их величины.

Имея ошибку измерения превышения, равную 2 мм (при  $S = 300$  м), получаем, что СКО на станции равна (15) [6]:

$$m_{cm} = 2,0 \times \sqrt{2} = 2,83 \text{ мм} \quad (15)$$

а на 1 км хода имеем (16) [6]:

$$m_{км} = 2,83 \times \sqrt{5} = 3,69 \text{ мм} \quad (16)$$

Найденное значение СКО на 1 км хода, равное 3,69 мм, отвечает критериям точности геометрического нивелирования III класса (допуск 5 мм).

Приняв во внимание полученные данные и используемые методы, делаем вывод, что при длине плеч до 300 м измерения необходимо проводить в два полных приема, используя метод измерений превышений из середины (двухстороннее). При влияниях короткопериодической рефракции, когда происходят заметные колебания цели, необходимо выполнять большее количество приемов, для достижения большей точности. Также немаловажным фактором является выбор удачного для измерений времени суток, однородной подстилающей поверхности по всей длине съемки.

Для холмистой местности, в условиях которой было проведено отдельное исследование, в ходе полученных данных был сделан вывод, что методика измерения превышений для местности с углами наклона  $\alpha = 16^\circ$  справедливы указания, представленные выше.

## 4      ОБОСНОВАНИЕ      И      ВЫБОР      МЕТОДИКИ НИВЕЛИРОВАНИЯ      II      -      III      КЛАССА ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

### 4.1      Проведение      исследования      в      лабораторных условиях

Исследование для обоснования методики нивелирования II класса проводилось в лабораторных условиях с применением эталонного превышения.

Для исследования была выбрана штриховая трехметровая рейка с инварной полосой РН-05, на которой деления на основную и дополнительные шкалы нанесены через каждые 5 мм. Оснащена данная рейка круглым уровнем. Рейка предназначена для высокоточного нивелирования (I и II классов) и обеспечивает ошибку накопления 0,5 мм на 1 км нивелирного хода. Технические характеристики рейки РН-05 представлены в таблице 10 [9].

Таблица 10 - Технические характеристики рейки РН-05

Характеристика	Значение
Длина рейки, мм	3000

Допустимая разность между средней длиной метра пары реек комплекта, мм	0,15
Стрелка прогиба на всю длину рейки, мм не более	3
Допустимое отклонение от номинального значения длины наименьшего интервала, мм	$\pm 0,05$

Перед выполнением исследования, необходимо провести поверку рейки. Поверка выполняется в соответствии нормативно-техническим документом [9], методика которого распространяется на все нивелирные рейки, и устанавливает средства и методы первичной и периодической поверок.

Процедура поверки рейки РН-05 в соответствии с нормативным документом включает в себя [9]:

- внешний осмотр;
- опробование;
- проверка силы натяжения инварной полосы;
- определение прямолинейности шкаловой поверхности;
- проверка ширины и длины штрихов шкалы;
- определение погрешности совмещения начала счета основной шкалы с плоскостью пятки рейки;
- определение погрешностей длины отдельных интервалов шкалы рейки;
- проверка перпендикулярности штрихов к продольной оси шкалы рейки;
- определение погрешностей длины метровых интервалов шкал рейки;
- проверка разности между средней длиной метровых интервалов пары реек комплекта;



- определение разности нулей основной и дополнительной шкал реек.

Допустимые значения метрологических характеристик представлены в таблице 11 [9].

Таблица 11 - Допустимые значения метрологических характеристик

Метрологические характеристики	Значение
Номинальное значение длины наименьшего деления, мм:	
Основной шкалы	5
Дополнительной шкалы	5
Допустимое отклонение от номинального значения длины отдельных интервалов рейки от номинального значения, не более, мм:	
Наименьшего деления	0,05
Дециметровых интервалов	0,08
Метровых интервалов	0,10
Погрешность совмещения начала счета основной шкалы рейки с плоскостью пятки, не более, мм	0,10
Отклонение от прямолинейности шкаловой поверхности рейки на всю длину, не более, мм	3

Продолжение таблицы 11

Метрологические характеристики	Значение
Сила натяжения полосы с отсчетной шкалой, Н	$200 \pm 10$
Длина и ширина штрихов шкалы, мм	$\pm 0,05$
Перпендикулярность штрихов к продольной оси шкалы, (°)	$\pm 15$
Разность между средней длиной метра двух реек комплекта, мм	0,15

Межпроверочные интервалы для периодической поверки устанавливаются метрологическими службами по согласованию с органами ГМС.

Проведением поверок нивелирных реек занимаются лица, имеющие геодезическое образование (средне специальное или высшее), имеющие стаж работы с приборами не менее 2 лет и аттестованные в качестве поверителя в соответствии с правилами по метрологии [9].

Для поверки должны быть соблюдены все условия для ее начала, а именно [9]:

- температура воздуха ( $20 \pm 5$  °С);
- относительная влажность ( $60 \pm 20$  %);
- плавные изменения температуры (в пределах 1 °С);
- шкаловые поверхности рейки должны быть протерты мягкой салфеткой, смоченной в бензине;
- в соответствии с требованиями стандартов и заводских инструкций по эксплуатации рейка должна быть подготовлена к работе.

После проведения поверок составляется протокол результатов, удовлетворяет ли поверяемое оборудование нормам нормативно-технической документации. При успешном прохождении поверки на рейку наносится клеймо организации, проводившей поверку. При отрицательных результатах составляется акт о непригодности, что влечет за собой запрет на использование при измерениях данной рейки, свидетельство о предыдущей поверке аннулируется.

Рейка РН-05, используемая в данном исследовании, соответствует все заявленным метрологическим характеристикам, представленным в таблице 11, и может быть использована для всех последующих работ.

Прибор, используемый в данном исследовании, Leica TCRP 1201 ( $m_\alpha = 1''$ ,  $m_s = 2$  мм), внешний вид которого представлен на рисунке 12 [2].



Рисунок 12 – Тахеометр Leica TCRP 1201

Технические характеристики ЭТ Leica TCRP 1201 представлены в таблице 12 [2].

Таблица 12 – Технические характеристики тахеометра Leica TCRP 1201

Характеристика	Значение
Точность угловых измерений	1"
Компенсатор	двухосевой, $\pm 4'$
Дальность измерения на отражатель	3500 м (на отражатель GPR1), 2000 м (на отражатель GRZ4, GRZ122)
Дальность измерений без отражателя	1000 м

*Продолжение таблицы 12*

Характеристика	Значение
----------------	----------

Точность линейных измерений на отражатель	1 мм + 1,5 ppm
Точность линейных измерений без отражателя	2 мм + 2 ppm
Увеличение зрительной трубы	30х
Клавиатура	буквенно-цифровая, цветной сенсорный дисплей
Специальные устройства	целеуказатель, лазерный центрир
Память	съёмная CompactFlash
Время работы	до 8 часов (от одного аккумулятора)
Вес прибора, кг	5,2
Температурный диапазон работы	От минус 35°C до плюс 50 °C
Защита от влаги и пыли	IP54
Точность позиционирования SmartStation	10 мм + 10 ppm (в плане), 20 мм + 10 ppm (по высоте)

В качестве эталонного превышения был взят интервал на рейке, равный 20 см. Исследование выполнялось по основной и дополнительной шкале рейки, путем прохождения данных интервалов от низа рейки вверх. Исследование состояло из 16 серий измерений, по 12 измерений в серии, выполненных одним полным приемом в безотражательном режиме. Измерения по порядку выполнялись между смежными интервалами на основной и дополнительной шкалах для удобства работы и снижения ее трудоемкости.

Рейка устанавливается в вертикальное положение по круглому уровню (после каждой серии измерений производится контроль положения пузырька круглого уровня), и опирается на распорки. Прибор необходимо привести в рабочее положение, а именно:

- установить ножки штатива в удобное для съемки положение, обеспечить их устойчивость, надежно закрутить винты (зафиксировать штатив);

- привести электронный уровень в нульпункт (круглый уровень для приведения тахеометра не используется, так не обеспечивает достаточной точности для проведения исследования);

- свести ошибку влияния МО на результаты исследования к минимуму (1") путем проведения поверки прибора на МО.

Значения, необходимые в исследовании – это разность высот между осью вращения зрительной трубы и отсчетом на рейке.

Результаты измерений, полученные ЭТ Leica TCRP 1201 с рейки РН-05 при  $S = 50$  м приведены в таблицах 13 – 20.

Таблица 13 – Результаты измерений с первых смежных отсчетов по рейке (по основной и дополнительной шкалам)

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП
10	-831,5	-832,0	72	-693,5	-694,1
	-831,6	-832,1		-693,5	-694,2
	-831,6	-832,0		-693,6	-694,1
	-831,5	-832,1		-693,7	-694,1
	-831,5	-832,1		-693,6	-694,2
	-831,5	-832,0		-693,6	-694,2
	-831,6	-832,0		-693,5	-694,1
	-831,6	-832,0		-693,6	-694,1
	-831,7	-832,0		-693,6	-694,2
	-831,6	-832,0		-693,7	-694,1
	-831,7	-832,0		-693,6	-694,2
	-831,6	-832,0		-693,6	-694,2
средне	-831,58	-832,03	средне	-693,59	-694,15
е			е		

Таблица 14 – Результаты измерений со вторых смежных отсчетов по рейке (по основной и дополнительной шкалам)

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП

14	-631,6	-632,2	76	-493,3	-494,3
	-631,6	-632,3		-493,2	-494,4
	-631,6	-632,2		-493,3	-494,2

*Продолжение таблицы 14*

Отсчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП
14	-631,6	-632,2	76	-493,3	-494,2
	-631,7	-632,1		-493,3	-494,2
	-631,6	-632,1		-493,4	-494,2
	-631,6	-632,2		-493,3	-494,2
	-631,6	-632,2		-493,4	-494,2
	-631,6	-632,2		-493,4	-494,2
	-631,5	-632,3		-493,4	-494,2
	-631,6	-632,2		-493,4	-494,2
	-631,6	-632,2		-493,3	-494,3
среднее	-631,60	-632,20	среднее	-493,33	-494,23

Таблица 15 - Результаты измерений с третьих смежных отсчетов по рейке (по основной и дополнительной шкалам)

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП
18	-431,4	-432,2	80	-293,5	294,3
	-431,6	-432,3		-293,5	294,3
	-431,5	-432,3		-293,6	294,4
	-431,5	-432,0		-293,5	294,4
	-431,5	-432,0		-293,5	294,3
	-431,5	-432,2		-293,5	294,4
	-431,5	-432,1		-293,5	294,4
	-431,6	-432,2		-293,4	294,4
	-431,6	-432,1		-293,4	294,3
	-431,5	-432,2		-293,5	294,3
	-431,6	-432,2		-293,5	294,3
	-431,6	-432,1		-293,5	294,4
среднее	-431,53	-432,16	среднее	-293,49	294,35

Таблица 16 – Результаты измерений с четвертых смежных отсчетов по рейке (по основной и дополнительной шкалам)

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП
22	-231,7	-232,1	84	-93,5	-94,2
	-231,6	-232,1		-93,3	-94,2
	-231,5	-232,1		-93,4	-94,2
	-231,5	-231,9		-93,3	-94,1
	-231,6	-232,0		-93,3	-94,1
	-231,6	-232,2		-93,3	-94,1
	-231,5	-232,1		-93,3	-94,1
	-231,5	-232,1		-93,4	-94,2
	-231,5	-232,1		-93,4	-94,2
	-231,5	-232,1		-93,4	-94,1
	-231,5	-232,0		-93,5	-94,1
-231,5	-232,1	-93,5	-94,2		
среднее	-231,54	-232,08	среднее	-93,38	-94,15
е			е		

Таблица 17 – Результаты измерений с пятых смежных отсчетов по рейке (по основной и дополнительной шкалам)

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП
26	-31,4	-32,0	88	106,5	105,7
	-31,5	-32,2		106,5	105,7
	-31,5	-32,2		106,5	105,8
	-31,4	-32,2		106,4	105,8
	-31,4	-32,1		106,4	105,8
	-31,4	-32,2		106,5	105,8
	-31,4	-32,1		106,5	105,8
	-31,4	-32,1		106,6	105,8
	-31,4	-32,1		106,5	105,9
	-31,4	-32,1		106,5	105,8
	-31,4	-32,0		106,4	105,8
	-31,4	-32,0		106,5	105,7
среднее	-31,42	-32,11	среднее	106,48	105,78
е			е		

Таблица 18 - Результаты измерений с шестых смежных отсчетов по рейке (по основной и дополнительной шкалам)

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП
30	168,5	167,9	92	306,2	305,6
	168,5	167,9		306,3	305,7
	168,5	167,9		306,3	305,7
	168,6	168,0		306,3	305,7
	168,5	168,0		306,3	305,6
	168,5	168,0		306,3	305,6
	168,5	168,1		306,3	305,6
	168,4	168,1		306,3	305,6
	168,4	168,0		306,4	305,6
	168,4	167,9		306,2	305,6
	168,4	167,9		306,3	305,6
	168,5	168,0		306,3	305,6
среднее	168,48	167,98	среднее	306,29	305,63
е			е		

Таблица 19 - Результаты измерений с седьмых смежных отсчетов по рейке (по основной и дополнительной шкалам)

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП
34	368,7	368,2	96	506,5	505,7
	368,6	368,2		506,4	505,8
	368,7	368,1		506,5	505,8
	368,7	368,1		506,5	505,9
	368,7	368,1		506,5	505,9
	368,6	368,2		506,5	505,8
	368,6	368,2		506,4	505,8
	368,6	368,2		506,4	505,8
	368,5	368,2		506,4	505,9
	368,5	368,1		506,6	505,8
	368,6	368,3		506,5	505,8
	368,6	368,2		506,5	505,8
среднее	368,62	368,18	среднее	506,48	505,82
е			е		



Таблица 20 - Результаты измерений с восьмых смежных отсчетов по рейке (по основной и дополнительной шкалам)

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)		Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)	
	КЛ	КП		КЛ	КП
38	568,4	567,9	100	706,7	705,7
	568,4	568,0		706,8	705,7
	568,5	568,1		706,7	705,6
	568,5	568,0		706,6	705,6
	568,5	568,0		706,5	705,6
	568,6	567,9		706,5	705,6
	568,5	568,0		706,6	705,6
	568,6	568,0		706,7	705,7
	568,6	568,0		706,6	705,6
	568,5	568,1		706,6	705,6
	568,5	568,1		706,6	705,6
568,5	568,0	706,7	705,7		
средне е	568,51	568,01	средне е	706,63	705,63

Средние значения измерения превышений по каждой из шкал, полученные одним полным приемом, представлены в таблице 21.

Таблица 21 - Средние значения измерения превышений, выполненных одним полным приемом

Отчет по рейке	Основная шкала (мм)	Отчет по рейке	Дополнительная шкала (мм)
10	-831,805	72	-693,870
14	-631,900	76	-493,780
18	-431,845	80	-293,920
22	-231,810	84	-93,765
26	-31,765	88	106,130
30	168,230	92	305,960
34	368,400	96	506,150
38	568,260	100	706,130

Для получения более конкретных данных, на основе которых можно делать некоторые выводы, необходимо найти разности средних значений превышений, выполненных одним полным приемом, между смежными отсчетами по каждой из шкал. Полученные разности представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Разности средних значений

Отсчеты по рейке	Основная шкала (мм)	Эталонное значение	$\Delta$ , мм	Отсчеты по рейке	Дополнительная шкала (мм)	Эталонное значение	$\Delta$ , мм
14-10	199,905	200,000	- 0,095	76-72	200,090	200,000	0,090
18-14	200,055	200,000	0,055	80-76	199,860	200,000	- 0,140
22-18	200,035	200,000	0,035	84-80	200,155	200,000	0,155
26-22	200,045	200,000	0,045	88-84	199,895	200,000	- 0,105
30-26	199,995	200,000	- 0,005	92-88	199,830	200,000	- 0,170
34-30	200,170	200,000	0,170	96-92	200,190	200,000	0,190
38-34	199,860	200,000	- 0,140	100-96	199,980	200,000	- 0,020

При идеальных условиях измерений разность средних значений измерений, полученных измерением одним полным приемом, должна быть равна 200,00 мм. Но различного рода ошибки вносят погрешности в полученные результаты. Погрешности в измерениях находятся в пределах от минус 0,17 до плюс 0,19 мм. Исходя из нормативных документов по требованию к нивелированию II класса, ошибка определения

превышения на станции не должна превышать  $\pm 0,3$  мм. Исходя из данных таблицы 22, ни одно из полученных значений не превышает допустимого значения.

На основе таблицы 22 были составлены графики зависимостей ошибки определения превышений от величины угла наклона. Данные графики представлены на рисунках 13 – 14.

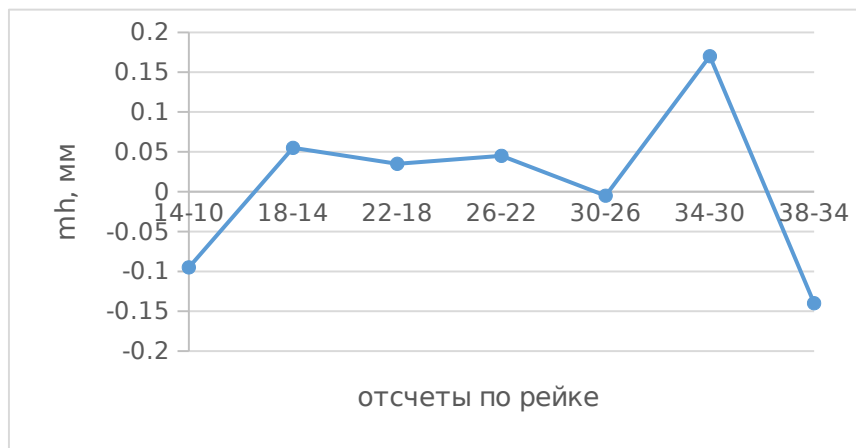


Рисунок 13 – График зависимости точности определения превышения от величины угла наклона (основная шкала)



Рисунок 14 – График зависимости точности определения превышения от величины угла наклона (дополнительная шкала)

Проведя анализ графиков можно сделать вывод, что с увеличением значения угла наклона увеличивается ошибка определения превышения. Данное ошибка возникает из-за увеличения влияния ошибки отклонения от прямолинейности шкаловой поверхности рейки.

Для более адекватной оценки полученных результатов, анализируя данные таблиц 13 – 20, можно сделать вывод, что максимальные разности  $h_{max}$  и  $h_{min}$  не превосходят допустимого интервала в 2" в линейной мере. Данная величина предельного значения была выбрана из условия, что при ограниченном числе измерений погрешность измерения не должна превышать двойной точности измерения углов тахеометром  $2m_\alpha$  (2") в линейной мере.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что данная методика полностью удовлетворяет точности нивелирования II класса.

Для увеличения точности полученных превышений также рекомендуется производить два полных приема измерений или производить измерения при нескольких горизонтах инструмента.

#### 4.2 Проведение исследования в полевых условиях

Для проведения полевых исследований не подходит использование метода эталонного превышения с применением одной лишь рейки, так как при нивелировании происходит определение превышения между двумя точками, находящимся на некотором расстоянии друг от друга. Поэтому для приближения условий исследования к условиям полевых нивелирных работ в исследовании [6] был использован метод

эталонного превышения с использованием двух вех с отражателями, расположенных друг от друга на некотором расстоянии, с точностью нивелирования III класса. При расположении реек в разных точках проявляется различие в условиях прохождения луча визирования при наведении на цели. Превышение между отражателями (эталонное превышение) находилось из результатов высокоточного геометрического нивелирования при одном положении прибора. Высокоточное геометрическое нивелирование выполнялось с помощью цифрового нивелира DiNI 12 в четыре горизонта. СКО измерения превышения была равной 0,03 мм. Исследование проводилось с использованием трех эталонных превышений.

Первый этап исследования проводился при одинаковом высотном положении двух отражателей, находящихся на высоте примерно 2,2 м от подстилающей поверхности, представляющей собой глинистую почву с незначительно поросшей травой. Длины плеч между целями были выбраны в интервале от 50 м до 200 м с шагом в 50 м. Измерения превышения между отражателями выполнялись в 15 полных приемов. Для полученных измерений были найдены их СКО отдельно для каждой цели и общего превышения. Также была проведена оценка определения превышения  $m_B$  по «внутренней сходимости», используя формулу Бесселя, а для результатов превышений  $m_G$ , полученных из геометрического нивелирования, была использована формула Гаусса. Полученные значения  $m_B$  и  $m_G$  согласовались между собой. Были найдены максимальные и минимальные разности значений превышений ( $h_{max}$  и  $h_{min}$ ) между осями вращения зрительной трубы и вращения отражателя, и для превышений между двумя целями визирования. Было установлено, что значения  $h_{max}$  и  $h_{min}$

при нахождении превышения между двумя точками не превосходили допустимой величины интервала  $\Delta_{\text{доп}}$ , вычисляемого из условия, что допуск, за пределы которого не должны выходить ошибки измерений, равен  $2(2m_\alpha)$ , где  $m_\alpha$  – угловая точность прибора ( $m_\alpha = 2''$ ). На основе представленных данных можно сделать вывод, что в худшем случае ошибки визирования при наведении на обе цели будут максимальны и разными знаками.

При проведении всех измерений при всех длинах плеч была составлена таблица разностей средних значений превышений, найденных способом тригонометрического нивелирования ( $h_T$ ) и способом геометрического нивелирования ( $h_G$ ). Данные полученных разностей представлена в таблице 23 [6].

Таблица 23 – Разности превышений  $h_T - h_G$

$S, \text{ м}$	$h_T, \text{ мм}$	$h_G, \text{ мм}$	$\Delta = h_T - h_G, \text{ мм}$
50	-200,7	-200,9	+0,2
100	-200,4		+0,5
150	-200,4		+0,5
200	-201,2		-0,3

Из данных таблицы 23 был сделан вывод, что при длине плеч до 200 м, значения превышений, полученные из результатов измерения тахеометром, могут быть определены с ошибкой менее 1,0 мм. Задача состоит лишь в том, чтобы задать необходимое для достижения необходимой точности оптимальное количество приемов.

При проведении второго этапа исследования [6] эталонное превышение было выбрано величиной около 0,5 м. Данная разность высот между отражателями была выбрана с целью

выявить степень влияния вертикальной рефракции на результаты измерения превышения в зависимости от высоты визирного луча над подстилающей поверхностью. Длины плеч были выбраны равными 82, 153 (при данном расстоянии выполнено две серии измерений, во второй серии прибор устанавливался на возвышенность высотой примерно 1 м) и 241 м. Для измерений находились их СКО. Из результатов измерений было установлено, что для расстояний в 153 м и 241 м, СКО определения значения превышения при наведении на передний отражатель больше, чем на задний. Данное положение связано с тем, что при наведении на переднюю цель луч был на меньшем расстоянии над подстилающей поверхностью, чем при наведении на заднюю цель. При этом также при меньшей высоте визирного луча над подстилающей поверхностью значения разностей между максимальными и минимальными значениями превышения, полученными в серии измерений для длин плеч, равными 153 м и 241 м, имели наибольшие числовые характеристики.

Максимальные расхождения между результатами, определенные между измеренными превышениями в серии, не превосходили установленного допуска. Были произведены сравнения превышений ( $h_T$  и  $h_G$ ), полученные при двух способах определения превышений. Данные представлены в таблице 24 [6].

Таблица 24 - Разности превышений  $h_T - h_G$

$S$ , м	Количество приемов	$h_T$ , мм	$h_G$ , мм	$\Delta = h_T - h_G$ , мм
82	8	-520,6	-520,1	-0,5
153	11	-520,5		-0,4

153*	8	-520,7		-0,6
241	18	-520,5		-0,4
* Тахеометр установлен на возвышенности.				

Также при проведении обработки измерений, были вычислены разности превышений между смежными превышениями. Было установлено, что максимальные изменения значений были близки к максимальным расхождениям по всей серии измерений. Из полученных данных следует, что в ряду превышений могут появиться значения, отличающиеся максимально от остальных. Данные значения могут быть получены вследствие комбинации неблагоприятных для измерений факторов [6]:

- случайные ошибки в отсчетах между отражателями, имеющие разный знак;
- близкие к предельным ( $2m$ ) или превосходящие их значения случайных ошибок с разными знаками;
- влияние короткопериодической составляющей рефракции на результаты нивелирования, носящей случайный характер.

Также на результаты нивелирования имеет влияние изменение метеорологических условий или степени освещенности Солнцем поверхности съемки, что влечет изменение регулярной рефракционной составляющей.

Вследствие влияния данных параметров на результаты нивелирования, превышения, которые могут быть искажены рефракцией на разную величину, необходимо определять при постоянных условиях внешней среды за как можно более короткий срок и в как можно больше приемов для увеличения точности полученных результатов и для подтверждения резкого, скачкообразного изменения коэффициента рефракции



или влиянии комбинации вышеперечисленных неблагоприятных факторов.

Третий этап выполнения исследования [6] проводился в период времени с 19 до 20 ч. При данном временном промежутке наблюдаются максимальные значения в скорости изменения коэффициента рефракции. На расстоянии 2 м друг от друга устанавливались два отражателя так, чтобы высота первой цели над поверхностью была равна 1,0 м, а второй 1,4 м. Измерения проводились с помощью электронного тахеометра Leica TS-06 ( $m_\alpha = 2,0''$ ), расположенным на расстоянии 175 м от отражателей. Были выбраны четыре программы наблюдений:

- $Z_{\text{кл}} P_{\text{кл}}$  (количество приемов равно 25);
- $Z_{\text{кп}} P_{\text{кп}}$  (количество приемов равно 25);
- $Z_{\text{кл}} P_{\text{кл}} P_{\text{кп}} Z_{\text{кп}}$  (количество приемов равно 20);
- $Z_{\text{кл}} Z_{\text{кп}} P_{\text{кл}} P_{\text{кп}}$  (количество приемов равно 20).

После выполнения измерений была проведена их оценка. Из полученных результатов было установлено, что наименее точные измерения углов наклона были выполнены при круге право [6]. Данная ошибка связана, вероятно, с личными ошибками наблюдателя. Также очевидно, что измерения, полученные полным приемом, более точные, чем одним полуприемом. Наиболее предпочтительной является четвертая программа в связи с меньшими переходами наблюдателя вокруг прибора. При выполнении измерений по четвертой программе следует начинать измерения с передней цели, для того, чтобы программа наблюдений стала симметричной.

Также для составления выводов было сделано сравнение результатов нивелирования, полученные тригонометрическим и геометрическим способами. Данные разностей  $h_T - h_G$  представлены в таблице 25 [6].

Таблица 25 - Разности превышений  $h_T - h_G$ 

Номер программы	$h_T$ , мм	$h_G$ , мм	$\Delta = h_T - h_G$ , мм
1	+388,39	+387,32	+1,07
2	+387,72		+0,40
3	+388,01		+0,69
4	+387,38		+0,06

Из данных таблицы 25 следует, что разности  $\Delta$  различаются между собой вплоть до 1,0 мм. Что свидетельствует о неустойчивом коэффициенте рефракции в период выполнения исследования. Также значения  $\Delta$  имеют один знак, что дает сделать вывод, что при визировании на отражатели (цели), расположенные на разной высоте, результаты определения превышений искажаются вертикальной рефракцией по - разному.

Отдельно от вышерассмотренных исследований, было проведен анализ других параметров, влияющих на качество измеренных превышений.

В условиях производства тригонометрического нивелирования, большую погрешность в результаты измерений вносит перемещение системы «штатив - тахеометр» (их оседание). Перемещение, то есть оседание, данной системы возникает вследствие установки прибора на грунт. Измерения производятся одним, а чаще несколькими полными приемами. Из произведенных ранее исследований по данной тематике по трем программам наблюдений на станции, описанным в пункте 2.1, для устранения влияния ошибки оседания на результаты нивелирования необходимо выполнять измерения по первой, симметричной, программе наблюдений.

Исследование [8] проводилось с условием, что марки, на которые производились измерения, находились на одной высоте (превышение между ними равно нулю) при горизонтальном положении трубы тахеометра, то есть  $MO = 0$ . Схема с данными влияния величины оседания системы «штатив – тахеометр» на результаты нивелирования приведена на рисунке 15 [8].

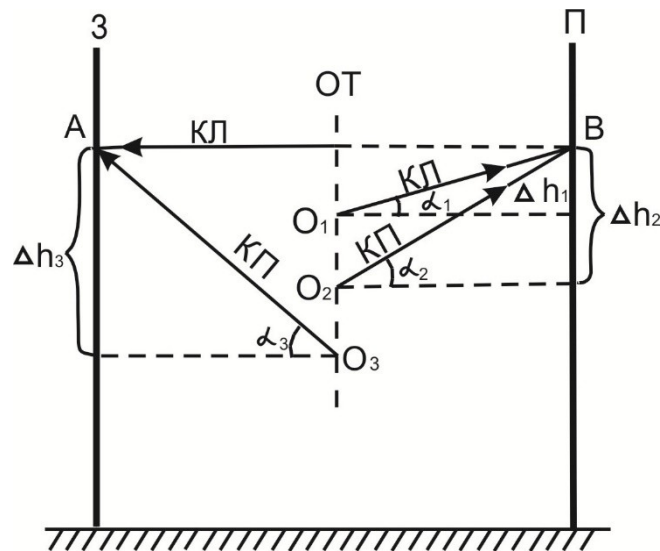


Рисунок 15 – Влияние оседания системы «штатив – тахеометр» на измеряемое превышение при симметричном наведении на отражательный элемент

При первом наведении отсчет равен А. При наведении при КП на марку В, происходит опускание системы «штатив – тахеометр» на величину  $O_1$ . Следовательно, придется поднимать трубу вверх, из-за чего появится угол наклона  $\alpha_1$  и величина  $h_1$  будет характеризовать условное поднятие марки В. Тогда при одном неполном приеме величина превышения находится по формуле (17) [8]:

$$h_{\text{кп}} = З_{\text{кп}} - П_{\text{кп}} = А - В = А - (В + \Delta h_1) = -\Delta h_1. \quad (17)$$

Из данной формулы следует вывод, что выполнять измерения одним полуприемом невозможно ввиду отягощения полученного превышения величиной оседания на величину  $-\Delta h_1$

При выполнении вторым полуприемом при наведении при КП на марку В ввиду оседания системы (с точки  $O_1$  на точку  $O_2$ ) появится новый угол наклона  $\alpha_2$ , то есть  $КП = В + (\Delta h_1 + \Delta h_1)$ . Но в это же время при наведении при наведении на марку А при КП снова происходит опускание системы (с точки  $O_2$  на точку  $O_3$ ) и вследствие появится новый угол наклона  $\alpha_3$ , что дает суммарное поднятие марки А на величину  $\Delta h_3 = \Delta h_1 + \Delta h_1 + \Delta h_1$ . Принимая во внимание тот факт, что значения опускания  $\Delta h_1$  между КЛ и КП равны, получаем (18) [8]:

$$h_{КП} = З_{КП} - П_{КП} = А - В = (А + \Delta h_3) - (В + \Delta h_2) = \Delta h_1. \quad (18)$$

Следовательно, принимая во внимание полученные из формул (17-18) значения, делаем вывод, что величины опускания при выполнении измерений по первой программе измерений в каждом из полуприемов в итоге компенсируют друг друга, что в итоге дает истинное значения превышения.

Данное утверждение справедливо только для первой (симметричной) программы наблюдений. Для двух других программ значение измеренного превышения будет отягощено величиной оседания системы даже при выполнении измерений полным приемом.

Выполняя измерения для второй и третьей программы наблюдений, имеем значения, представленные на рисунке 16 [8].

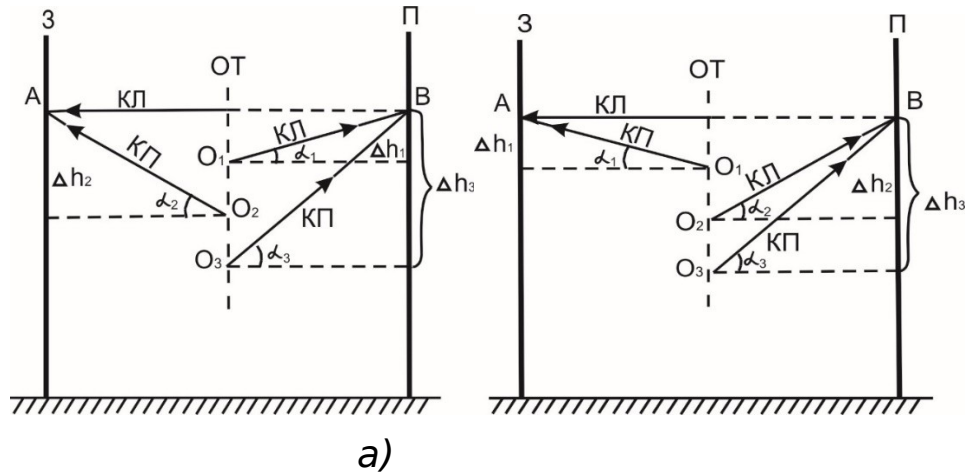


Рисунок 16 – Влияние оседания системы «штатив – тахеометр» на измеряемое превышение при одном и двух приемах: а) по второй программе при 1-ом горизонте; б) по третьей программе при 1-ом горизонте;

Для второй программе получаем (19) [8]:

$$h_{\text{изм}} = h_{\text{ср}} = -\Delta h_1. \quad (19)$$

Для третьей программы имеем (20) [8]:

$$h_{\text{изм}} = h_{\text{ср}} = -2\Delta h_1. \quad (20)$$

Для повышения точности измерения превышений следует увеличивать либо количество приемов, либо количество горизонтов инструмента.

Для первой программы при втором горизонте инструмента, согласно рисунку 17 [8] и принимая значения, полученные выше, получаем, что влияния оседания системы «штатив – тахеометр» компенсируется полностью.

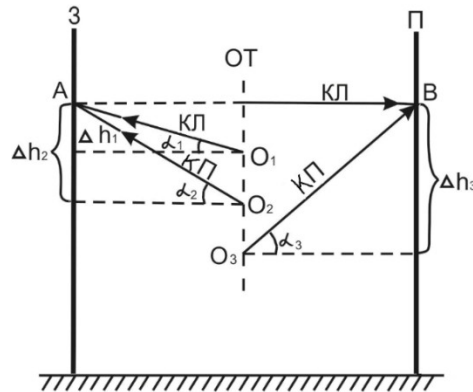


Рисунок 17 – Влияние оседания системы «штатив – тахеометр» на измеряемое превышение при симметричном наведении при втором горизонте

Для второй программы при втором горизонте инструмента, согласно рисунку 18 [8] и принимая значения, полученные выше, получаем, что значение оседания, равное минус  $\Delta h_1$  при первом горизонте, и значение оседания при втором горизонте, равное  $\Delta h_1$ , компенсируют друг друга, вследствие получают истинные значения результатов нивелирования.

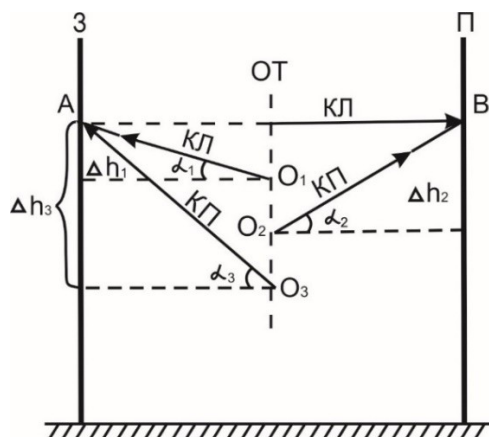


Рисунок 18 – Влияние оседания системы «штатив – тахеометр» на измеряемое превышение при одном и двух приемах при втором горизонте

Для третьей программы при втором горизонте инструмента, согласно рисунку 19 [8] и принимая значения, полученные выше, получаем, что значение оседания, равное минус  $2\Delta h_1$  при первом горизонте, и значение оседания при втором горизонте, равное  $2\Delta h_1$ , компенсируют друг друга, вследствие получают истинные значения результатов нивелирования.

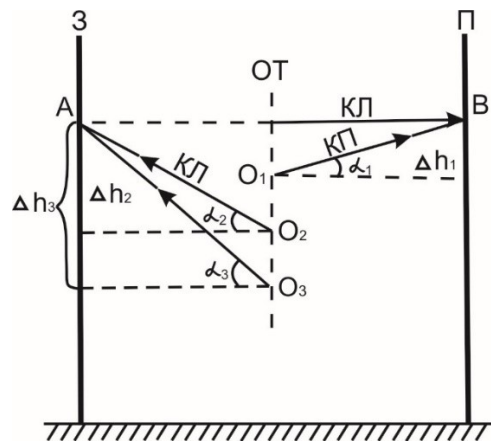


Рисунок 19 – Влияние оседания системы «штатив – тахеометр» на измеряемое превышение при одном и двух приемах по третьей программе при втором горизонте

Но для выполнения измерений рекомендуется выполнять измерения по первой программе измерений вследствие того, что эта программа дает истинные значения превышений даже при одном горизонте системы.

Также стоит очень внимательно относиться к влиянию МО на результаты измеренных превышений. Данный параметр вносит существенные погрешности в результаты высокоточного

нивелирования. МО непрерывно изменяется под влиянием изменения температуры воздуха. Данное значение поверяется и вводится перед началом производства нивелирных работ. Для того, чтобы МО не искажала результаты нивелирования, было произведено исследование.

Исследование [8] выполнялось так же по трем программам измерений, описанным в пункте 2.1.

В исследовании влияние изменения температуры приводило к наклону визирного луча вверх. Схема измерений представлена на рисунке 20 [8].

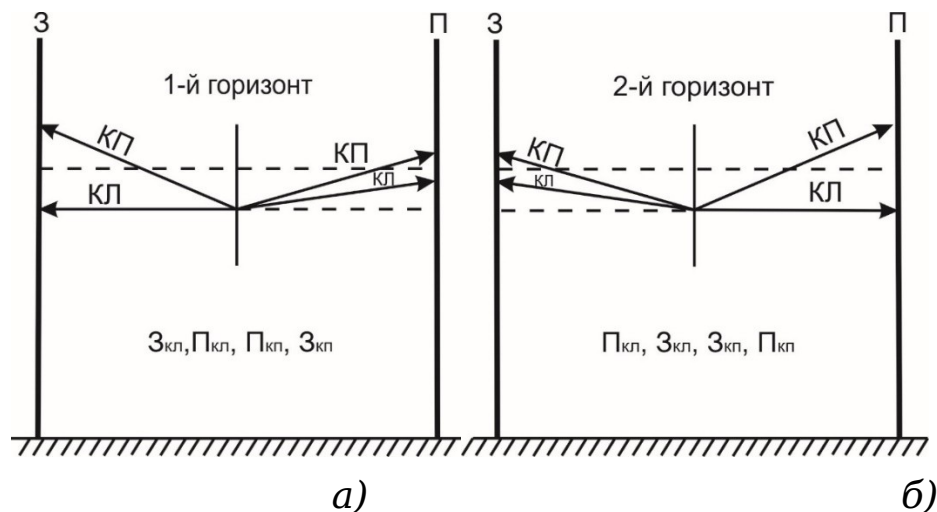


Рисунок 20 – Влияние изменения МО для первой программы:

а) при первом горизонте; б) при втором горизонте

Полученное превышение при КЛ будет иметь значение (21) [8]:

$$h_{\text{КЛ}} = Z_{\text{КЛ}} - П_{\text{КЛ}} = A - B = A - (B + \Delta h_1) = -\Delta h_1, \quad (21)$$



а при КП имеет значение (22) [8]:

$$h_{\text{КП}} = Z_{\text{КП}} - П_{\text{КП}} = A - B = (A + \Delta h_1 + \Delta h_1) - (B + \Delta h_1) = \Delta h_1. \quad (22)$$

Анализируя полученные данные, делаем вывод, что влияние изменения МО при выполнении измерений по первой программе никак не влияет на результаты измерения превышения. Это справедливо и для двух горизонтов измерений.

Для второй программы измерений, имеем полученное превышения для КЛ, равное (рисунок 21) (23) [8]:

$$h_{\text{КЛ}} = Z_{\text{КЛ}} - П_{\text{КЛ}} = A - B = A - (B + \Delta h_1) = -\Delta h_1, \quad (23)$$

а при КП имеет значение, равное (24)

$$h_{\text{КП}} = Z_{\text{КП}} - П_{\text{КП}} = A - B = (A + \Delta h_1 + \Delta h_1) - (B + \Delta h_1 + \Delta h_1 + \Delta h_1) = -\Delta h_1. \quad (24)$$

Значение превышения, полученное из полного приема, имеет значение, равное минус  $\Delta h_1$ .

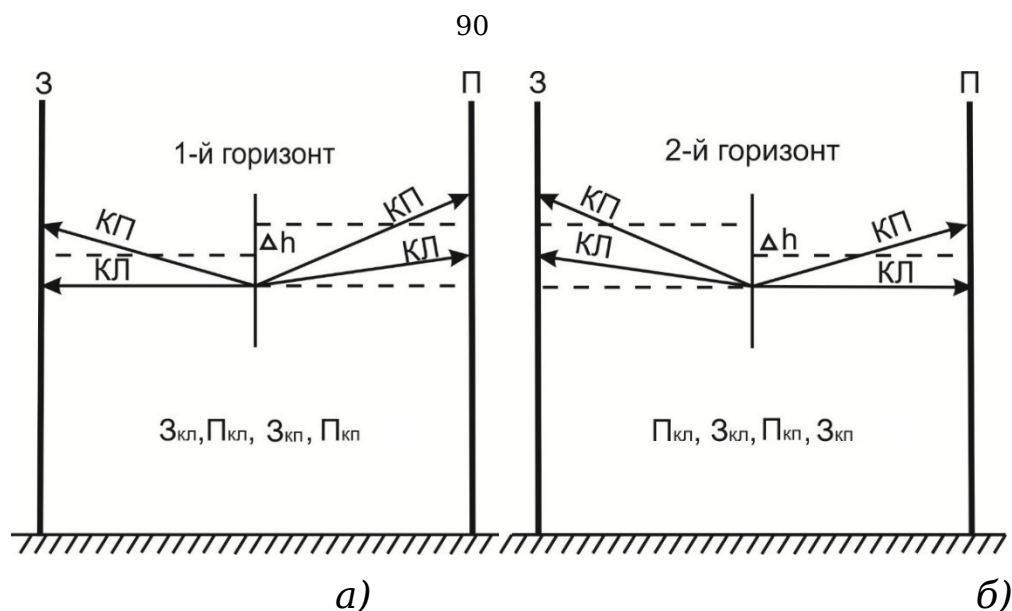


Рисунок 21 - Влияние изменения МО для второй программы:  
а) при первом горизонте; б) при втором горизонте

Для третьей программы измерений, имеем полученное превышения для КЛ, равное (рисунок 22) (25) [8]:

$$h_{\text{КЛ}} = Z_{\text{КЛ}} - П_{\text{КЛ}} = A - B = A - (B + \Delta h_1 + \Delta h_1) = - 2\Delta h_1, \quad (25)$$

а при КП имеет значение, равное (26) [8]

$$h_{\text{КП}} = Z_{\text{КП}} - П_{\text{КП}} = A - B = (A + \Delta h_1) - (B + \Delta h_1 + \Delta h_1 + \Delta h_1) = - 2\Delta h_1. \quad (26)$$

Значение превышения, полученное из полного приема, имеет значение, равное минус  $2\Delta h_1$ .

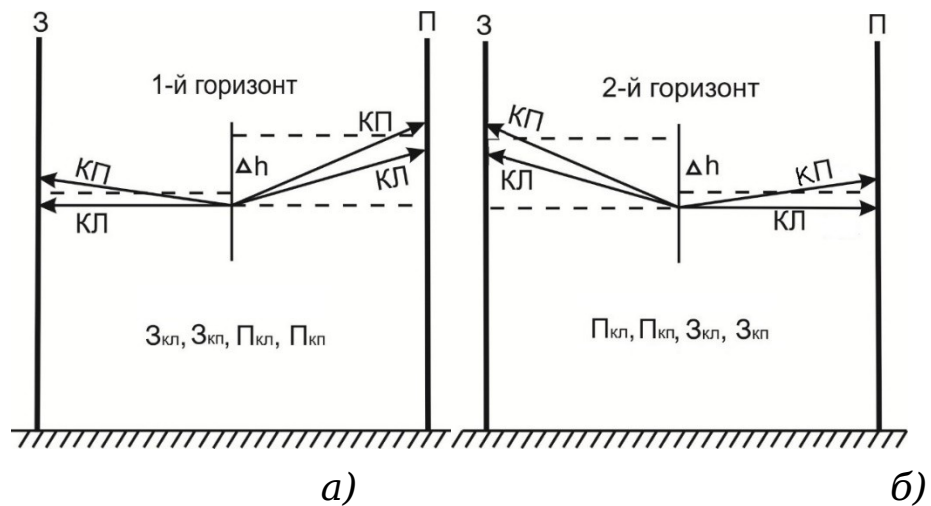


Рисунок 22 – Влияние изменения МО для третьей программы:

а) при первом горизонте; б) при втором горизонте

Очевидно, что при проведении измерений при двух горизонтах системы, влияние МО будет значительно ослаблено.

Исходя из результатов исследований, была составлена методика для тригонометрического нивелирования II класса:

- необходимо привести прибор в рабочее положение;
- необходимо выполнять измерения в определенное время суток, на однородном покрытии двухсторонним нивелированием, следовать всем замечаниям для снижения влияния рефракционной ошибки на результаты нивелирования;
- выполнение измерений производить по первой программе наблюдения на станции (Z<sub>кл</sub>, P<sub>кл</sub>, P<sub>кп</sub>, Z<sub>кп</sub>) для компенсации влияния оседания системы «штатив – тахеометр» и МО на результаты измерений;
- выполнять как можно больше измерений для повышения точности результатов нивелирования.
- использовать оборудование, пригодное для выполнения нивелирования II класса и прошедшее метрологическую аттестацию.

Таким образом, результаты наших исследований показывают, что:

- при соблюдении всех методик и при использовании приборов соответствующей точности можно добиться точности III класса нивелирования с использованием тригонометрического;

- в некоторых случаях, при использовании всех указаний, можно добиться точности II класса нивелирования тригонометрическим способом.

## 5 ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ

Сметная стоимость – документ, в котором отображена совокупность денежных средств, которая необходима для осуществления производства конкретных работ в соответствии с проектными материалами. Данный документ является основой для расчета финансирования каждой из составляющих производства работ (расчеты за выполнение работ, оплата расходов по приобретению оборудования, транспорт и т.д.).

Для проведения нивелирных работ III класса был произведен расчет сметной стоимости, приведённый в таблице А.1 приложения А. Расчет производился при участии повышающих коэффициентов, взятых из сборника базовых цен на 2006 год [10].

Единицей измерения работ был принят 1 км нивелирного хода III класса.

Категория сложности в соответствии с районом работ – 2 категория согласно части 4 главы 12 СБЦ – 2006.

Районный коэффициент к заработной плате, исходя из района работ, был взят равным  $K_1 = 1.1$  согласно таблице 3 СБЦ – 2006.

Стоимость 1 км нивелирного хода в районе работ был принят равным 3950 рублей.

Процент от сметной стоимости полевых работ, рассчитанных на 1 месяц, при расстоянии от базы до объекта

работ, равным 50 км, на транспортные расходы был принят в размере 14 % согласно таблице 5 СБЦ – 2006.

Расходы по организации и ликвидации работ приняты в размере 6% от сметной стоимости полевых работ согласно пункту 13 общих сведений СБЦ – 2006.

Повышающий коэффициент на стоимость работ на II квартал 2019 года к ценам 2006 года был принят равным  $K = 4,17$  согласно письма Минстроя РФ от 19.02.2016 №4688-ХМ/05.

## 6 ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Техника безопасности при проведении нивелирных работ заключается в следующем. Перед работами в полевых условиях необходимо обследовать район работ, наметить расположение нивелирных ходов, обследовать местность на наличие населенных пунктов, средств связи и дорог, наметить наиболее безопасный план работ, выбрать лучшие условия для отдыха и труда.

Также должен быть решен вопрос о предоставлении транспорта для переезда бригады на участок работ и переездам по нему. Решается вопрос с руководством о продовольственном снабжении и снабжении оборудованием.

В каждой бригаде для контроля за соблюдением правил по технике безопасности, охране труда и производственной санитарии избирается общественный инспектор по охране труда.

Руководитель бригады перед выездом на полевые работы обязан:

- изучить и сдать поверочные испытания по технике безопасности;
- распределить обязанности среди рабочих бригады;
- провести с рабочими вводный инструктаж по технике безопасности, ознакомить с условиями работы и правилами внутреннего распорядка

При выполнении работ в летний период следует опасаться получения светового удара, солнечного ожога, укуса пресмыкающихся и насекомых. Для устранения влияния данных факторов необходимо при сильной жажде пить ранее подготовленную воду, исключив питье из водоемов, так как это может привести к заражению бактериями и вредными веществами. При сильной жаре на некоторое время стоит прекратить работу и уйти в тень. При получении работником теплового удара выполнить весь комплекс действий по уходу за пострадавшим, по возможности обратиться за квалифицированной медицинской помощью. Немаловажным фактором является правильный подбор одежды – следует носить легкую одежду из натуральных материалов, при этом обязательно ношение головного убора. Для предотвращения укуса пресмыкающихся и насекомых следует носить закрытую спецодежду, имеющую москитную сетку; использовать отпугивающие средства, держаться подальше от нор и не интересоваться их содержимым. Также не стоит заходить в высокую траву.

Помимо человека, воздействию солнечных лучей также подвержено оборудование. Перегрев оборудования ведет к погрешностям в измерениях. Для уменьшения влияния данной проблемы следует хранить оборудование вне досягаемости

солнечных лучей, работать под зонтом или накрывать оборудование.

Техника безопасности при рекогносцировке в основном предусматривает выбор безопасного места для закладки геодезического знака. При установке геодезических знаков (вех и мачт на деревья) работники должны быть в защитных касках. Для установки вех и мачт разрешается использовать только растущие деревья, имеющие здоровые стволы (не менее 15 см в диаметре). Подъем производится с помощью когтей, при использовании предохранительных поясов (с грузом на за плечами не более 6 кг). Мачты и вехи длиной до 8 м и диаметром не более 10 см разрешается поднимать самостоятельно; при больших размерах при помощи специальных механизмов. При подъеме вех и мачт техника и рабочий состав должен находиться на расстоянии не менее полуторной высоты их высоты. Запрещается устанавливать лагерь и палатки для жилья вблизи мачт, вех. Вершины деревьев спиливать для установки приборов и видимости запрещается



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первом разделе выпускной квалификационной работы был выполнен анализ применяемых методов создания государственных нивелирных сетей I – IV классов, высотных сетей сгущения. Также были описаны другие способы выполнения нивелирования, используемые при этом приборы и методики, краткий анализ встречающихся при данном виде нивелирования ошибок.

Во втором разделе было уделено внимание схеме и методике выполнения тригонометрического нивелирования и встречающимся при выполнении измерений ошибкам.

В третьем разделе был выполнен анализ результатов исследования при выполнении тригонометрического нивелирования III – IV классов в лабораторных и полевых условиях с использованием метода эталонного перемещения; с учетом всех полученных данных и влияния различного рода ошибок была составлена методика выполнения тригонометрического нивелирования с получением результатов, не превышающих заданной точности. Было установлено, что достичь точности нивелирования III – IV классов при использовании тригонометрического способа можно, выполняя измерения небольшими (до 250 м) лучами визирования. Также в выпускной квалификационной работе было выполнено исследование о возможности выполнения тригонометрического нивелирования II – III класса короткими лучами в лабораторных и полевых условиях с применением метода эталонного превышения. Результаты ошибок определения превышения, полученные в лабораторных условиях, колеблющиеся в

пределах от минус 0,17 до плюс 0,19 мм, соответствуют точности определения превышения II класса нивелирования.

Кроме того, в выпускной квалификационной работе были рассмотрены вопросы безопасности при выполнении нивелирных работ. При рассмотрении вопросов экономики был выполнен расчет сметной стоимости выполненных нивелирных работ III класса точности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Высотные (нивелирные) сети сгущения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://lektsii.org/5-57244.html> – Загл. с экрана

2 Геодезические приборы и оборудование Leica [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://geosystems.ru> – Загл. с экрана

3 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. ГКИНП (ГНТА) – 03-010-03.2004 [Текст]. – Москва.: ЦНИИГАиК, 2004. – 226 с.

4 Мозжухин, О. А. Метод учета вертикальной рефракции с использованием метеопараметров атмосферы [Текст] / О. А. Мозжухин // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1981. – № 5. – С. 56–63.

5 Нивелирование и его виды [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/2855809/page:12> – Загл. с экрана

6 Никонов, А. В. Совершенствование методики тригонометрического нивелирования короткими лучами [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Никонов Антон Виктрович. – Новосибирск, 2015. – 263 с.

7 Райзман, Г. П. О некоторых закономерностях коэффициента вертикальной рефракции [Текст] / Г. П. Райзман // Геодезия и картография. – 1972. – № 1. – С. 25–31.

8 Рахымбердина, М. Е. Исследование и совершенствование высокоточного инженерно-геодезического нивелирования цифровыми нивелирами и электронными тахеометрами [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Рахымбердина Маржан Есенбековна. – Новосибирск, 2013. – 24 с.

9 Рейки нивелирные. Методика поверки МИ 02-00 – 01.04.2001 [Текст]. – Москва.: ЦНИИГАиК, 2004. – 38 с.

10 Справочник базовых цен на инженерные изыскания для строительства. Инженерно-геодезические изыскания для строительства и эксплуатации зданий/ – Москва, ПНИИИС, 2006 – 121 с.

11 Тригонометрическое нивелирование: методы, способы, схема [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://geostart.ru/post/310\\_](https://geostart.ru/post/310_) – Загл. с экрана

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
(обязательное)

РАСЧЕТ СМЕТНОЙ СТОИМОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НИВЕЛИРНЫХ РАБОТ III КЛАССА  
ТОЧНОСТИ

Таблица А.1

№ п. п	Виды работ	Обоснование цен	Категория сложности	Единица измерения	Цена единицы измерения, руб	Поправочные коэффициенты	Стоимость единицы с учетом коэффициента	Объем работ, км	Стоимость работ, руб.
						К1			
1	Нивелирование III класса	СБЦ-2006	2	1 км нив.хода	3950	1,1	4345	50	217250
2	Итоги полевых								217250
3	Транспортные расходы								30415
4	Орглики								13035
5	Всего по работам								260700
6	Итого сметная стоимость в текущих ценах с учетом повышающего коэффициента на II квартал 2019 года (К = 4,17)								1087119
7	Итого								1087119
8	НДС 20 %								217424
9	Всего по смете								1304543