

На правах рукописи

Никонов Антон Викторович

Совершенствование методики тригонометрического нивелирования  
короткими лучами

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2015

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Уставич Георгий Афанасьевич

Официальные оппоненты:

Вшивкова Ольга Владимировна, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», профессор кафедры высшей геодезии;

Брынь Михаил Ярославович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», заведующий кафедрой «Инженерная геодезия».

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия» (г. Омск).

Защита состоится «22» декабря 2015 г. в 15-00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

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

<http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/anton-nikonov-v/>

Автореферат разослан «30» октября 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Середович В. А.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.  
Подписано в печать 20.10.2015 г. Формат 60×84 1/16.  
Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ .  
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Тригонометрическое нивелирование до конца XIX в. было одним из основных методов создания высотной основы и широко применялось для высотного обоснования топографических съемок. Затем, в связи с развитием метода геометрического нивелирования, определение превышений наклонным лучом стало применяться реже. С 1951 г. сотрудниками ЦНИИГАиК, а также другими авторами были выполнены обширные исследования точности тригонометрического нивелирования. Основное внимание было направлено на повышение точности тригонометрического нивелирования в сетях триангуляции: при прохождении визирного луча на высоте 10–50 м над подстилающей поверхностью и визировании на цели, удаленные на расстояние от 3 до 20 км. Тригонометрическое нивелирование короткими (до 250 м) лучами не получило широкого распространения для создания высотного обоснования вследствие недостаточной точности получаемых результатов, что связано с отсутствием приборов соответствующей точности, а также влиянием вертикальной рефракции.

На территории нашей страны создание государственной нивелирной сети проводилось и проводится в настоящее время геометрическим нивелированием I, II, III и IV классов. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.12.2010 г. № 2378-р утверждена Концепция развития отрасли геодезии и картографии до 2020 г.

В целях развития государственной высотной основы поставлена задача по разработке и реализации комплексного плана поддержания государственных нивелирных сетей (II–IV классов) в соответствии с новыми требованиями к плотности нивелирных пунктов, достаточной для создания стратегического запаса высотного обеспечения Российской Федерации, в том числе для обеспечения обороны и безопасности государства. Решение данной задачи в определенной степени может быть выполнено путем применения тригонометрического нивелирования. Это обусловлено тем, что с появлением высокоточных электронных тахеометров (ЭТ) стало возможным производить нивелирование III и IV классов точности тригонометрическим методом. Однако, исследований в данной области, подтверждающих возможность выполнения тригонометрического нивелирования, соответствующего по точности III и IV классам, недостаточно. В настоящее время в отечественной литературе и в нормативных документах тригонометрическое нивелирование рассматривается как способ развития высотных сетей технической точности при инженерно-геодезических изысканиях.

В связи с этим, исследование и разработка методики нивелирования III и IV классов, выполняемого тригонометрическим методом, является актуальной научно-технической задачей.

*Степень разработанности темы.* Со второй половины XIX в. был выполнен большой объем исследований влияния приземного слоя атмосферы на точность различных геодезических измерений, в том числе и тригонометрического нивелирования. Значительный вклад в эти исследования внесли отечественные и зарубежные ученые, такие, как Струве В. Я., Померанцев И. И., Цингер Н. Я., Рыльке С. Д., Изотов А. А., Пеллинен Л. П., Конопальцев И. М., Островский А. Л., Прилепин М. Т., Куштин И. Ф., Голубев А. Н., Михайлов В. С., Юношев Л. С., Вшивков В. Ф., Вшивкова О. В., Редьков В. С., Малковский О. Н., Дрок М. К., Никольский Е. К., Мозжухин О. А., Беспалов Ю. И., Jordan W., Kukkamaki T. I., Kharaghani G. A., Chrzanowski A., Rueger J. M., Brunner F. K. и другие.

Результаты выполненных некоторыми авторами исследований показывают, что тригонометрическое нивелирование короткими лучами может выполняться с более высокой точностью, чем техническое нивелирование. Однако, на основании данных исследований не сформулированы достаточные рекомендации, выполнение которых позволит достигнуть требуемой точности.

*Цель и задачи исследования.* Целью исследования является совершенствование методики тригонометрического нивелирования короткими (до 250 м) лучами с применением электронных тахеометров для выполнения государственного нивелирования III и IV классов, а также инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов.

Основные задачи исследования:

– выполнить анализ существующих методов производства государственного нивелирования I–IV классов, инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов, а также способов тригонометрического нивелирования и учета влияния вертикальной рефракции на его результаты;

– выполнить исследования точности тригонометрического нивелирования с применением высокоточных электронных тахеометров при длине визирного луча до 300 м;

– выполнить исследования влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования при длине визирного луча до 400 м;

– усовершенствовать методику тригонометрического нивелирования короткими лучами, позволяющую обеспечить точность государственного нивелирования III и IV

классов, а также инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов при углах наклона визирного луча более  $2^\circ$ ;

– провести апробацию усовершенствованных методик тригонометрического нивелирования короткими лучами с целью установления соответствия между показателями точности полученных результатов и требованиями государственного нивелирования III и IV классов и инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов;

– дополнить локальную поверочную схему (ЛПС) для средств измерения превышений, включив в нее тахеометры, а также разработать схему полевого высотного стенда и порядок работы на нем с целью определения метрологических характеристик тахеометров применительно к выполнению государственного нивелирования: средней квадратической ошибки (СКО) измерения превышения на станции и на 1 км двойного хода.

*Научная новизна* результатов исследования заключается в следующем:

– выполнены исследования точности тригонометрического нивелирования на станции и получены новые результаты, которые показали, что применение современных ЭТ ( $m_\alpha \leq 2''$ ) при соблюдении ряда требований позволяет обеспечить точность государственного нивелирования III и IV классов при длине визирного луча до 250 м;

– усовершенствована методика тригонометрического нивелирования, в соответствии с которой требуется определять превышения способом из середины двумя-тремя приемами по разработанным автором программам измерений и при максимальном неравенстве плеч на станции 10–30 м, что позволяет обеспечить точность выполнения государственного нивелирования III и IV классов и при этом увеличить длину визирного луча в сравнении с методом геометрического нивелирования с 75 до 250 м;

– усовершенствована методика тригонометрического нивелирования короткими лучами, которая позволяет обеспечить точность выполнения инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов при углах наклона до  $8^\circ$ – $12^\circ$  за счет повышения точности измерения расстояний при использовании в качестве визирных целей отражательных пленок.

*Теоретическая и практическая значимость работы.* Теоретическая значимость работы заключается в обосновании возможности применения высокоточных ЭТ для выполнения государственного нивелирования III и IV классов, в разработке соответствующих программ наблюдений на станции, а также в усовершенствовании локальной поверочной схемы для поверки тахеометров.

Практическая значимость работы заключается в использовании усовершенствованных методик тригонометрического нивелирования, применение которых при вы-

полнении государственного нивелирования III и IV классов позволяет увеличить длину визирного луча с 75 до 250 м, а при нивелировании 1-го и 2-го разрядов определять превышения при углах наклона визирного луча до  $8^{\circ}$ – $12^{\circ}$ .

*Методология и методы исследования* включают в себя использование теории ошибок измерений, статистическую обработку результатов измерений и методы математического моделирования. Для обработки производственных измерений использовалось программное обеспечение: Microsoft Excel, AutoCAD, Credo DAT.

*Положения, выносимые на защиту:*

- результаты исследования точности тригонометрического нивелирования на станции с применением высокоточных ЭТ при длине визирного луча до 300 м;
- методика государственного нивелирования III и IV классов, выполняемого тригонометрическим методом короткими (до 250 м) лучами;
- усовершенствованная методика инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов, выполняемого тригонометрическим методом при углах наклона визирного луча до  $8^{\circ}$ – $12^{\circ}$ ;
- дополненная локальная поверочная схема для средств измерения превышений, а также схема полевого высотного стенда для проведения поверок ЭТ с целью определения метрологических характеристик: СКО измерения превышения на станции и на 1 км двойного хода.

*Степень достоверности и апробация результатов исследования.* Результаты исследований, полученные в диссертации, прошли апробацию при участии автора в организациях АО «Сибтехэнерго» и ЗАО «Железобетонспецстрой» в ходе выполнения геодезических работ на объектах строительства Няганской ГРЭС и Череповецкой ГРЭС, а также на эксплуатируемых объектах – Экибастузской ГРЭС-1, Рефтинской ГРЭС, Назаровской ГРЭС, Бийской ТЭЦ-1, Южно-Сахалинской ТЭЦ-1 и др.

Результаты исследования, выводы и практические рекомендации были представлены в 13 докладах и обсуждались:

- на IX Международной научной конференции «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» в рамках Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013», 15–26 апреля 2013 г., г. Новосибирск;
- на IV Международной Олимпиаде Credo, 5–6 февраля 2014 г., г. Казань;
- на X Международной научной конференции «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» в рамках Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014», 8–18 апреля 2014 г., г. Новосибирск;

– на XI Международной научной конференции «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» в рамках Международного научного конгресса «Интерэкс-по ГЕО-Сибирь-2015», 13–25 апреля 2015 г., г. Новосибирск.

Усовершенствованная в ходе диссертационных исследований методика тригонометрического нивелирования 1-го и 2-го разрядов была внедрена в геодезическое производство в АО «Сибтехэнерго» и ЗАО «Железобетонспецстрой», а разработанная методика государственного нивелирования III и IV классов, выполняемого тригонометрическим методом, внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Во введении* обосновывается актуальность темы работы, формулируется цель и задачи исследования, раскрывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту, отмечается степень достоверности результатов исследования.

*В первом разделе* рассмотрены существующие методики производства государственного нивелирования I, II, III и IV классов, а также основные источники ошибок геометрического нивелирования. Выполнен анализ существующих способов определения превышений, из которого следует вывод, что на сегодняшний день геометрическое нивелирование III и IV классов может быть заменено более эффективным тригонометрическим методом при длине визирного луча до 250 м. По результатам анализа современного состояния нивелирования III и IV классов сформулированы задачи исследования.

*Во втором разделе* диссертации выполнен анализ применения тригонометрического нивелирования в различных отраслях производства. Из анализа следует, что основным источником ошибок тригонометрического нивелирования является вертикальная рефракция, а точность получаемых результатов значительно различается. Это связано с отсутствием общепринятой методики выполнения нивелирования и разнообразием применяемых геодезических приборов. Несмотря на то, что электронные тахеометры с ошибкой измерения угла наклона менее 2,0" и ошибкой измерения расстояния менее 2,0 мм появились в геодезическом производстве порядка 10 лет назад, до сих пор нормативными документами разрешается выполнять тахеометрами лишь техническое нивелирование.

В третьем разделе диссертации представлены результаты лабораторных и полевых исследований точности тригонометрического нивелирования короткими лучами с применением ЭТ ведущих производителей (Leica, Sokkia) с ошибкой измерения угла наклона  $m_\alpha = 2''$ . Для определения СКО измерения превышения на станции электронными тахеометрами многократно измерялись превышения  $h$  между осью вращения зрительной трубы и отражателем (по 15 приемов в серии). После этого отражатель перемещался по вертикали на 40–50 мм и измерения производились снова. Величины перемещений отражателя фиксировались штангенциркулем ( $m_L = 0,10$  мм) и в дальнейшем использовались как эталонные. Ошибка  $m_h$  для каждой серии подсчитывалась по формуле Бесселя, она представляет собой СКО превышения между тахеометром и отражателем, измеренного одним приемом. Обобщенные результаты оценки точности представлены на рисунке 1, а.

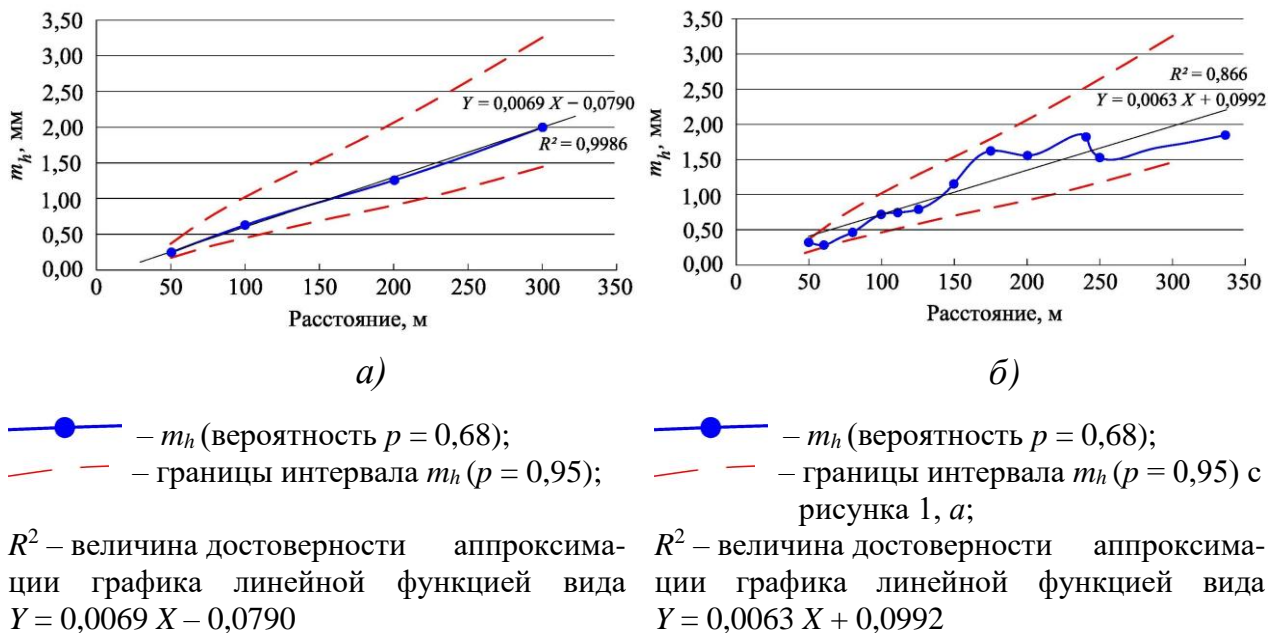


Рисунок 1 – Ошибки  $m_h$  измерения превышения в зависимости от расстояния до цели:

а) из исследований со штангенциркулем; б) из исследований с нивелиром

Кроме того, осредненные значения измеренных тахеометром превышений  $h_{cp}$  сравнивались с эталонными значениями. Полученные разности не превысили 1,3 мм для расстояний от 50 до 120 м и 1,7 мм для расстояний от 200 до 300 м.

На следующем этапе исследований эталонные превышения между двумя рядом расположенными точками измерялись поверенным высокоточным нивелиром с ошиб-

кой  $m_{\text{нст}}$  не более 0,10 мм. В дальнейшем на точках устанавливались два одинаковых отражателя, превышение между которыми измерялось ЭТ при длине плеч от 50 до 340 м. Для каждого расстояния выполнялся ряд серий по 10–15 приемов в серии.

Зависимость величины ошибки измерения превышения  $m_h$  от расстояния представлена на рисунке 1, б. Из рисунка 1, б видно, что построенный график изменения  $m_h$  не выходит за границы ранее построенного интервала для вероятности  $p = 0,95$ . Характер графика (рисунок 1, б) объясняется проведением исследований при различных погодных условиях. Расчетные значения  $m_h$ , полученные по уравнениям аппроксимирующих прямых (см. рисунок 1, а, б), различаются не более, чем на 0,15 мм.

На рисунке 2 представлена зависимость ошибки измерения превышения на станции между двумя отражателями  $m_{\text{нст}}$  от расстояния. Построенный график был аппроксимирован линейной функцией вида  $Y = 0,0064 X + 0,3254$ , используя которую можно вычислить СКО превышения на станции для расстояний до 300 м ( $p = 0,68$ ). Установлено, что в большинстве случаев отклонения измеренных на станции превышений от эталонных значений не превышают  $\pm 1,5 m_{\text{нст}}$ . Разность среднего значения превышения, измеренного ЭТ на станции 10–15 приемами, и эталонного значения превышения не превосходит 1,0 мм при расстоянии до отражателей от 50 до 340 м.

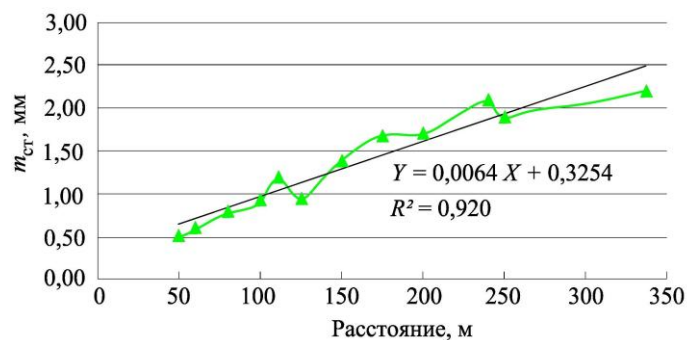


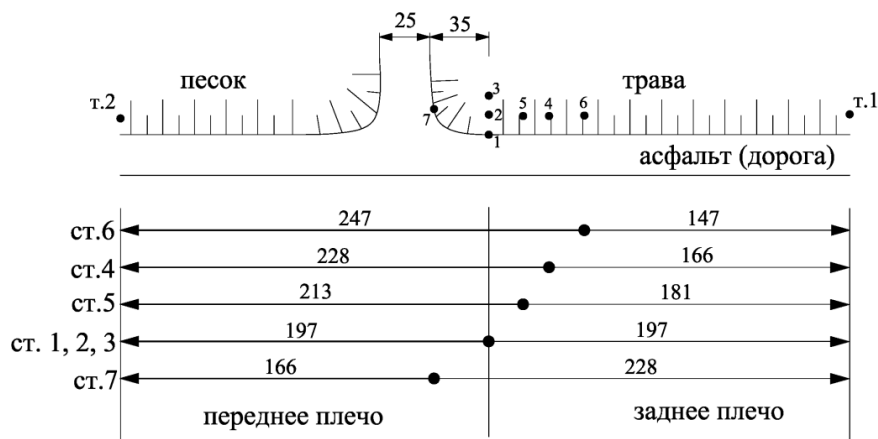
Рисунок 2 – Зависимость ошибки  $m_{\text{нст}}$  от длины плеч нивелирования

Исследованиями установлено, что, при выполнении измерений на цели вертикального базиса размером 0,5 м, его длина, полученная из тригонометрического нивелирования, может отличаться от теоретического значения на величину от 0,4 до 1,0 мм. Это отличие объясняется неравномерным искривлением визирного луча при наведении на нижнюю и верхнюю цели, которые имеют разную высоту над подстилающей поверхностью. Кроме того, СКО измерения угла наклона визирного луча на

цель, имеющую высоту  $\sim 1,0$  м над подстилающей поверхностью, на  $0,3''$ – $0,6''$  больше, чем при визировании на цель, установленную на высоте  $1,5$ – $2,0$  м.

В связи с тем, что главным источником ошибок в тригонометрическом нивелировании является вертикальная рефракция, было выполнено определение коэффициентов рефракции  $k$  геодезическим способом на базисах длиной от  $150$  до  $400$  м. Измерения выполнялись в разных погодных условиях и преследовали цель установить величину допустимого неравенства плеч на станции.

Наиболее показательными являются исследования, выполненные в облачную погоду при  $t = 17$  °С. На наклонном участке местности были установлены два штатива с отражателями, эталонное значение превышения  $h_{\Sigma}$  между которыми было получено из высокоточного геометрического нивелирования. Далее превышения измерялись тахеометром Leica TS-06 ( $m_{\alpha} = 2''$ ) с концов базиса способом вперед, а также с семи станций способом из середины (рисунок 3).



Размеры указаны в метрах

Рисунок 3 – Схема установки тахеометра при выполнении нивелирования

Результаты измерений и оценки точности представлены в таблице 1, в которой  $m_{\text{Б}}$  и  $m_{\text{Г}}$  – СКО измерения превышения на станции, вычисленные соответственно по формулам Бесселя (внутренняя сходимость) и Гаусса.

Установлено, что фактическая СКО измерения угла наклона при использовании стандартных отражателей и длине плеч до  $200$  м не превосходит ее паспортного значения и с вероятностью  $p = 0,95$  находится в интервале  $0,76'' < m_{\alpha} < 2,01''$ .

Ошибки нивелирования  $\Delta$  превышают соответствующие допустимые значения  $\Delta_{\text{доп}}$  для станций 2, 3, 4, 6, 7. Несоответствие на этих станциях ошибок  $m_{\text{Б}}$  и  $m_{\text{Г}}$  свиде-

тельствует о наличии систематической ошибки в результатах измерений. По характеру изменения  $\Delta$  (как по знаку, так и по величине) в зависимости от неравенства плеч и высоты визирного луча над подстилающей поверхностью можно сделать вывод о том, что систематическая ошибка вызвана влиянием рефракции.

Таблица 1 – Результаты оценки точности измеренных превышений

Но- мер стан- ции	$n$ при- емов	Неравен- ство плеч, м	$m_h$		$m_{hст}$		$\Delta_h =$ $= h_{max} - h_{min},$ мм	$\Delta =$ $= hЭ - hТ,$ мм	$\Delta_{доп} =$ $= 3m_B / \sqrt{n},$ мм
			$m_z,$ мм	$m_{п},$ мм	$m_B,$ мм	$m_T,$ мм			
1	15	0,2	0,8	0,7	1,0	1,0	3,2	-0,25	0,8
2	15	0,6	0,8	0,8	1,3	1,9	4,3	-1,38	1,0
3	15	0,2	2,3	1,8	1,9	4,8	7,4	+4,26	1,5
4	10	61,2	0,6	1,0	1,3	3,9	3,6	+1,59	1,2
5	10	32,3	0,9	1,3	1,3	1,5	4,4	-0,44	1,2
6	10	99,6	0,6	1,5	1,5	8,9	4,5	+5,26	1,4
7	10	62,3	1,1	0,6	0,9	5,2	2,9	-2,92	0,8

Исследованиями установлено, что при нивелировании строго из середины, но при низком прохождении визирного луча над подстилающей поверхностью при взгляде на одну из целей, измеренное на станции превышение искажается систематическим влиянием рефракции (станция 3,  $\Delta = 4,26$  мм). При изменении неравенства плеч в два раза с 30 до 60 м (станции 4 и 5) ошибка за рефракцию увеличивается примерно в четыре раза, что подтверждает квадратичную зависимость рефракционной ошибки от расстояния.

Результаты измерений с конечных точек базиса представлены в таблице 2, из которой следует, что полученный коэффициент рефракции  $k = -3,3$  значительно отличается от табличного значения  $k = +0,14$ , и это должно учитываться при установлении допуска на неравенство плеч на станции.

Таблица 2 – Результаты одновременного двустороннего нивелирования

Номер точки	$n$	$\Delta = h_T - h_Э,$ мм	Время измерений	$\Delta_h = h_{max} - h_{min},$ мм	$m_B,$ мм	$k$
т.1	30	-40,06	14:47 – 15:08	19	4,0	-3,29
т.2	30	-38,56	15:23 – 15:43	12	2,6	-3,32

Если допустить, что коэффициент рефракции  $k$  имеет одно и то же значение при визировании на задний и передний отражатели, то можно рассчитать ошибку за рефракцию на станции в зависимости от неравенства плеч и величины  $k$ . Результаты

расчета для расстояния между отражателями 400 м и углов наклона визирного луча  $\alpha = 5^\circ$  представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Ошибки за рефракцию на станции при расстоянии между целями 400 м

Неравенство плеч, м	Ошибка за рефракцию, мм, при коэффициенте рефракции					
	0,13	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
2	0,01	0,03	0,06	0,13	0,19	0,25
5	0,02	0,08	0,16	0,32	0,47	0,63
10	0,04	0,16	0,32	0,63	0,95	1,27
15	0,06	0,24	0,47	0,95	1,42	1,90
30	0,12	0,47	0,95	1,90	2,85	3,80
60	0,25	0,95	1,90	3,80	5,70	7,59

Выполненные исследования подтвердили выводы других авторов, что в пасмурную погоду коэффициент рефракции  $k$ , как правило, не превосходит величины минус 2,0, а в солнечную погоду минус 4,0. Для нивелирования III класса за предельную ошибку на станции, вызванную влиянием рефракции, была принята величина 1,5 мм. В результате были установлены следующие допуски на неравенство плеч на станции: в солнечную погоду 10 м, в пасмурную погоду 20 м. Для нивелирования IV класса приняты допустимые значения: 20 м в солнечную и 30 м в пасмурную погоду. Эти допуски на неравенство плеч рекомендуются для длины визирного луча до 300 м.

Из исследований, проведенных зимой в условиях снежного покрова на базисе длиной  $S = 170$  м, установлено, что измеренные превышения в основном больше истинных ( $k > 0$ ), при этом значения коэффициентов рефракции по абсолютной величине небольшие, и в конкретном случае не превысили плюс 0,5. Таким образом, зимний период вполне пригоден для выполнения нивелирования III и IV классов тригонометрическим методом.

При выполнении тригонометрического нивелирования также необходимо обеспечивать соблюдение следующих требований:

- выбирать места установки тахеометра таким образом, чтобы условия прохождения визирного луча «назад» и «вперед» были примерно однородны как в отношении подстилающей поверхности, так и высоты визирного луча;

- исключать прохождение визирного луча ниже 1,0 м над подстилающей поверхностью;

- устанавливать тахеометр и отражатели на высоте не менее 1,5 м над подстилающей поверхностью.

Электронные тахеометры могут использоваться для выполнения инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов при длине плеч до 10 и 25 м соответственно. Расчет показал, что наибольшее влияние на точность измеренного на станции превышения оказывает ошибка измерения расстояния, особенно при углах наклона визирного луча более  $3^\circ$ . С целью определения фактической точности измерения расстояний электронными тахеометрами были проведены исследования, в ходе которых многократно измерялись расстояния до визирных целей в безотражательном режиме. Цели перемещались в горизонтальной плоскости на величины от 0,2 до 3 900,0 мм, которые измерялись штангенциркулем или интерферометром. В ходе исследований установлено, что СКО измерения расстояния для  $S < 25$  м не превышает 1,0 мм, а при использовании отражательной пленки составляет  $m_S < 0,5$  мм. Это свидетельствует о возможности увеличения допустимого угла наклона визирного луча при выполнении нивелирования 1-го и 2-го разрядов соответственно до  $8^\circ$  и  $12^\circ$ , что подтвердилось в ходе лабораторных и производственных измерений.

Для выполнения нивелирования одним исполнителем была разработана и изготовлена визирная марка, которая закрепляется на осадочной марке болтового типа посредством резьбы (рисунок 4). Исследования с визирными марками показали, что при длине визирного луча до 10 м и углах наклона до  $20^\circ$  превышение на станции может быть измерено с ошибкой от 0,10 до 0,25 мм.



Рисунок 4 – Визирная марка

В четвертом разделе представлена методика тригонометрического нивелирования III и IV классов и обобщенная методика инженерно-геодезического нивели-

рования 1-го и 2-го разрядов, которые разработаны на основе выполненных полевых исследований и теоретического расчета. При разработке методики государственного нивелирования, выполняемого тригонометрическим методом, было принято условие, что средняя квадратическая ошибка измерения превышения на 1 км хода в одном направлении не должна превышать для III и IV классов величин  $m_{III} < 3,8$  мм и  $m_{IV} < 7,0$  мм соответственно.

Для предрасчета точности тригонометрического нивелирования способом из середины применялась формула

$$m_{h_{ст}}^2 = (2 \sin^2 \alpha) m_s^2 + \frac{2S^2 m_\alpha^2}{\rho^2} + \frac{S^4}{4R^2} (k_2 - k_1)^2. \quad (1)$$

При этом в расчетах принималась величина  $\Delta k = k_2 - k_1 = 0,5$ .

На основе предрасчета точности и полевых исследований установлено, что для выполнения тригонометрического нивелирования III класса следует использовать тахеометры с ошибкой измерения угла наклона  $m_\alpha \leq 2,0''$ . При этом превышение на станции следует измерять двумя приемами при длине плеч до 175 м и тремя приемами – при длине плеч от 175 до 250 м.

В таблице 4 представлены возможные программы наблюдений двумя приемами на станции при выполнении государственного нивелирования тригонометрическим методом. Программы 1 и 3 также предлагается использовать для выполнения инженерно-геодезического нивелирования. С целью унификации программ измерения в приемах всегда начинаются при «круге лево».

Таблица 4 – Программы наблюдений на станции

Номер программы	Прием				Число обходов наблюдателя вокруг тахеометра				
	первый		второй						
1	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	З <sub>КП</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	П <sub>КП</sub>	1
2	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	З <sub>КП</sub>	З <sub>КЛ</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	П <sub>КП</sub>	П <sub>КЛ</sub>	1
3	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	2
4	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	3
5	З <sub>КЛ</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	З <sub>КП</sub>	З <sub>КЛ</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	З <sub>КП</sub>	4
6	З <sub>КЛ</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КЛ</sub>	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	П <sub>КП</sub>	П <sub>КП</sub>	З <sub>КП</sub>	4
7	З <sub>КЛ</sub>	П <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	З <sub>КП</sub>	П <sub>КЛ</sub>	З <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	П <sub>КП</sub>	5
8	З <sub>КЛ</sub>	П <sub>КЛ</sub>	З <sub>КП</sub>	П <sub>КП</sub>	П <sub>КЛ</sub>	З <sub>КЛ</sub>	П <sub>КП</sub>	З <sub>КП</sub>	6

Примечание – З и П обозначают заднюю и переднюю визирные цели соответственно; КЛ – «круг лево»; КП – «круг право».

При выборе наиболее оптимальных программ для выполнения тригонометрического нивелирования необходимо учитывать следующие требования:

а) соблюдение последовательности наблюдений, при которой обеспечивается ослабление влияния вертикальной рефракции на результаты измерения превышения на станции;

б) обеспечение минимально возможного влияния перемещения системы «штатив – тахеометр» на измеряемое превышение на станции и в нивелирном ходе;

в) обеспечение необходимой точности измерения превышения на станции;

г) обеспечение минимального количества перемещений наблюдателя вокруг тахеометра.

При приблизительно равномерном изменении коэффициента рефракции во время производства измерений на станции и равномерном выпирании штатива обеспечение требований а) и б) достигается выбором симметричной программы. Выполнение требования в) обеспечивается избыточными измерениями углов наклона на станции. Выполнение требования г) ведет к уменьшению времени работы на станции, что, в свою очередь, повышает точность и производительность измерений.

Программу 1 предлагается использовать в основном при выполнении инженерно-геодезического нивелирования, так как в этом случае ход обычно прокладывается по осадочным маркам, штатив устанавливается на жестком основании, а длина хода, как правило, не превышает 1–2 км. Программу 2 удобно использовать при наличии одного отражателя и следует применять при проложении ходов III или IV классов длиной не более 5 км в благоприятных (средней плотности) грунтах в пасмурную погоду. Программа 3 является симметричной при выполнении четного числа приемов, поэтому ее целесообразно применять при длине плеч до 175 м (два приема) или при проложении хода III класса в одном направлении (четыре приема).

Программа 4 требует наличия двух отражателей, при этом последовательность отсчетов не является симметричной как при выполнении одного, так и при выполнении двух приемов. В связи с этим программу 4 применять нецелесообразно.

Применение программы 5 предусматривает симметричность отсчетов в каждом приеме. Программа 5 является универсальной и может применяться как при выполнении двух приемов (при длине плеч до 175 м), так и при выполнении трех приемов (при длине плеч 175–250 м).

Программа 6 не симметрична в отношении «круга лево» и «круга право» и требует выполнения четного числа приемов, поэтому не рекомендуется для применения. При использовании программ 7, 8 наблюдателю требуется пять-шесть раз обходить

прибор, что может привести к нарушению стабильности системы «штатив – тахеометр» и увеличивает время работы на станции.

При визировании на две цели (вертикальный базис) предлагается выполнять измерения на станции по программам, представленным в таблице 5. При этом предварительно определенное значение длины базиса используется для контроля результатов тригонометрического нивелирования на станции.

Таблица 5 – Программы наблюдений при визировании на цели вертикального базиса

Номер приема	Программа Б1	Программа Б2	Программа Б3
1-й прием	$Z_{(н)КЛ} Z_{(н)КП}$	$Z_{(н)КЛ} Z_{(в)КЛ}$	$Z_{(н)КЛ} Z_{(в)КЛ}$
			$Z_{(н)КП} Z_{(в)КП}$
	$P_{(н)КЛ} P_{(н)КП}$	$P_{(н)КЛ} P_{(в)КЛ}$	$P_{(н)КЛ} P_{(в)КЛ}$
			$P_{(н)КП} P_{(в)КП}$
2-й прием	$P_{(в)КЛ} P_{(в)КП}$	$P_{(н)КП} P_{(в)КП}$	$P_{(н)КЛ} P_{(в)КЛ}$
			$P_{(н)КП} P_{(в)КП}$
	$Z_{(в)КЛ} Z_{(в)КП}$	$Z_{(н)КП} Z_{(в)КП}$	$Z_{(н)КЛ} Z_{(в)КЛ}$
			$Z_{(н)КП} Z_{(в)КП}$
Примечание – Индексы «н» и «в» обозначают нижнюю и верхнюю цели, соответственно.			

В соответствии с «Наставлением по нивелированию III и IV классов и по высотным теодолитным ходам» (1941 г.), нивелирные ходы III класса между знаками высших классов, а также замкнутые ходы прокладывались в одном направлении. В 1950 г. Бурмистров Г. А. также высказывался о целесообразности проложения ходов III класса между исходными реперами лишь в одном направлении. Тем не менее, инструкции по нивелированию I–IV классов, выпускаемые с 1955 г., требуют выполнять нивелирование III класса в прямом и обратном направлении с целью минимизации ошибок за перемещение костылей и контроля измерений.

Предрасчет точности  $m_{\text{нст}}$  по формуле (1) показывает, что, при измерении превышения на станции четыре раза и длине визирного луча до 225 м, ходы тригонометрического нивелирования III класса между исходными реперами могут прокладываться в одном направлении, что ведет к повышению производительности работ приблизительно в 1,7 раза. Ошибки в ходе за перемещение костылей в основном устраняются вследствие следующих особенностей выполнения тригонометрического нивелирования:

– в качестве переходных точек используются костыли или деревянные колья длиной 0,3–0,5 м с шурупом в верхней части, так как они менее подвержены выпиранию (оседанию), чем нивелирные башмаки;

– наиболее интенсивные смещения костылей происходят в первые 1–2 минуты после забивки. Указанные смещения происходят в процессе установки на кольца отражателей в неподвижное положение, т. е. до начала измерений;

– вешки с отражателями устанавливаются на костылях неподвижно и удерживаются подпорками (без нажима реечника), при этом вешка не снимается с костыля при переходе наблюдателя и имеет меньший вес по сравнению с рейкой;

– увеличение длины визирного луча с 75 м в геометрическом нивелировании до 200 м в тригонометрическом позволяет сократить количество переходных точек в ходе, и, соответственно, уменьшить ошибки за их вертикальные перемещения;

– время измерений на станции при работе с тахеометром несколько больше, чем с нивелиром (на 2–6 мин), так как предусматривается 2- или 4-кратное определение превышения на станции. Это предполагает практически полную стабилизацию перемещений костылей (колеб) до момента перехода наблюдателя на следующую станцию. Таким образом, почти полностью исключается наиболее крупная составляющая ошибки за неустойчивость костылей, обусловленная перемещениями костылей во время перехода наблюдателя;

– измерения на четной и нечетной станциях предлагается всегда начинать с задней цели, чтобы к моменту наблюдений «вперед» перемещение переднего костыля в большей мере стабилизировалось.

Тригонометрическое нивелирование III и IV классов необходимо проводить способом из середины лучами длиной до 250 м и руководствоваться при этом требованиями, представленными в таблице 6.

Таблица 6 – Требования к выполнению нивелирования III и IV классов

Параметр	III класс	IV класс	
	$m_a \leq 2''$	$m_a \leq 2''$	$m_a = 5''$
Максимальная длина плеч при визировании, м:			
на деление шашечной рейки	120	150	120
на пленку 25 × 25 мм (50 × 50 мм)	75 (150)	100 (150)	75 (100)
на отражатель (в пасмурную погоду)	200 (250)	250 (300)	100 (125)
Допуск на неравенство плеч, м:			
солнечно	10	20	20
пасмурно	20	30	30
Допуск на накопление неравенства плеч, м	30	35	35
Число приемов на станции, не менее:			
для длины луча $S < 175$ м	2	2	2*
для длины луча $175 \text{ м} < S < 250$ м	3	2	–
ход в одном направлении $S < 225$ м	4	–	–

## Окончание таблицы 6

Параметр	III класс	IV класс	
	$m_a \leq 2''$	$m_a \leq 2''$	$m_a = 5''$
Допуск на разность превышений между целями из двух приемов, мм:			
плечи до 50 м	2	3	3
плечи 50 – 100 м	3	5	5
плечи 100 – 150 м	4	6	–
плечи 150 – 250 м	6	8	–
Допуск на несовпадение измеренной длины база-са с теоретическим значением, мм	3	4	3
Число направлений хода	2**	1	1
* При длине визирного луча до 125 м. ** При выполнении четырех приемов допускается проложение хода в одном направлении.			

Визирование следует выполнять одним из следующих способов:

- на деления нескладных шашечных или штрих-кодовых реек (для  $S < 120$  м);
- на отражательные пленки (для  $S < 150$  м);
- на отражатели, закрепляемые на вешках или штативах (для  $S < 250$  м).

Нивелирование IV класса также может выполняться способом одновременного двустороннего нивелирования в процессе проложения тахеометрического хода по трехштативной системе со сторонами до 300 м. При этом время между измерениями в прямом и обратном направлении следует сокращать.

В ходе исследований использовались различные тахеометры ведущих производителей (Leica, Sokkia). Для выявления возможности применения конкретного ЭТ к выполнению государственного нивелирования предлагается дополнить существующую локальную поверочную схему для средств измерения превышений, включив в состав рабочих средств измерений электронные тахеометры.

Действующая инструкция по нивелированию (2004 г.) устанавливает для нивелиров предельные величины инструментальных СКО измерения превышений на 1 км двойного хода для III и IV классов 3,0 мм и 6,0 мм соответственно. Применение электронных тахеометров для нивелирования III и IV классов требует определять такие их метрологические характеристики, как СКО измерения превышения на станции и на один километр двойного хода. Для этих целей предлагается усовершенствованная схема полевого высотного стенда (рисунок 5).

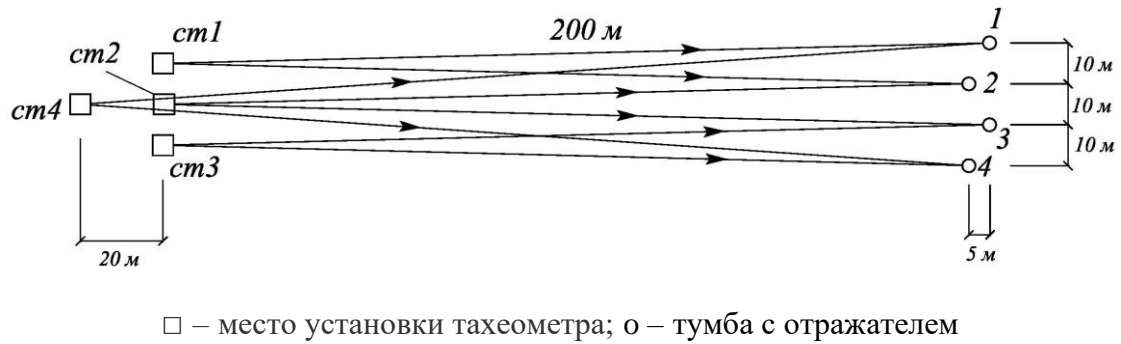


Рисунок 5 – Схема полевого высотного станда для поверки ЭТ

Станд представляет собой четыре стационарные тумбы (1–4) с возможностью принудительного центрирования приборов и позволяет выполнять исследования ЭТ при длине визирного луча порядка 200 м. На тумбах 1–4 устанавливают трегеры с адаптерами в виде штока. Превышения между верхними частями адаптеров многократно измеряются поверенным высокоточным нивелиром с ошибкой  $m_{\text{нст}} < 0,10$  мм и принимаются в качестве эталонных. После этого на адаптерах закрепляют отражатели и превышения определяют тригонометрическим методом.

Тахеометр на штативе устанавливается последовательно на станциях *ст1*, *ст2*, *ст3* и *ст4*, с которых измеряются превышения  $h_{1-2}$ ,  $h_{2-3}$ ,  $h_{3-4}$ ,  $h_{4-1}$  соответственно. Измерение превышений в порядке 1–2–3–4–1 составляет ход в прямом направлении. Затем со станции 4 после изменения горизонта инструмента прокладывают ход в обратном направлении: 1–4–3–2–1. На этом заканчивается первый прием измерений, в результате чего длина двойного хода составит примерно 1 650 м. Так как длина хода должна быть не менее 10 км, выполняют не менее 6 приемов измерений. Наблюдения на станции необходимо проводить в два приема по программе 3 или 5 (см. таблицу 4).

Ошибки измерения превышений на станции  $m_{\text{нст}}$  вычисляются по формуле Гаусса по отклонениям от эталонных значений. Ошибки  $m_{\text{нст}}$  при длине плеч 200 м не должны превышать для III и IV классов 2,7 мм и 6,0 мм соответственно.

На основе исследований, выполненных в работе и ранее другими авторами, предложена обобщенная методика инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов тригонометрическим методом (таблица 7).

Таблица 7 – Требования к высокоточному тригонометрическому нивелированию

Условия и допуски тригонометрического нивелирования	Основные технические характеристики и допуски для нивелирования разрядов	
	1	2
Характеристики электронных тахеометров	$m_a \leq 2''$ , $m_s \leq 2$ мм	
Допустимый угол наклона	8°	12°
Число приемов	2	2
Допустимое расхождение между двумя наведениями на штрих (цель) $\Delta$ , мм	0,2	0,3
Допустимое расхождение длины базиса с контрольным значением, мм	0,3	0,4
Допустимое расхождение между превышениями из двух горизонтов (при работе по программе 3), мм	0,3	0,4
Длина визирного луча не более, м	10	25
Неравенство плеч на станции не более, м	3,5	5,0
Число направлений хода	2*	1
Допускаемая невязка ( $f_{\text{доп}}$ ) в замкнутом ходе ( $n$ – число станций), мм	$\pm 0,3 \sqrt{n}$	$\pm 0,5 \sqrt{n}$
* При проложении замкнутого хода нивелирование выполняется в одном направлении.		

Измерения следует выполнять сдвоенными отсчетами по программе 1 (см. таблицу 4). В случаях, когда штатив может подвергаться перемещениям (вибрация, неблагоприятные грунты) или изображение целей колеблется, наблюдения необходимо выполнять в два приема по симметричной во времени программе 3. При визировании на две цели (вертикальный базис) измерения проводят по программе Б3 (см. таблицу 5) в один прием.

Предельные углы наклона визирного луча, указанные в таблице 7, могут быть увеличены до 20°, если при визировании на заднюю и переднюю цели они имеют одинаковую величину (в пределах 5°) и одинаковый знак. В качестве визирных целей рекомендуется применять отражательные пленки.

Результаты выполненных исследований показывают несоответствие между требованиями действующих нормативных документов и возможностями современных геодезических инструментов. Применение электронных тахеометров с ошибкой измерения угла наклона  $m_a \leq 2''$  и ошибкой измерения расстояния  $m_s \leq 2,0$  мм позволяет выполнять нивелирование III или IV классов при развитии высотных государственных сетей, обеспечении изыскательских и строительных работ, а также проводить нивелирование 1-го и 2-го разрядов при наблюдениях за осадками зданий, сооружений и оборудования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании теоретических и практических исследований решена научно-техническая задача по совершенствованию методики тригонометрического нивелирования короткими лучами для выполнения государственного нивелирования III и IV классов, а также инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов.

В ходе диссертационного исследования были получены следующие основные результаты:

– выполнен анализ производства государственного нивелирования I–IV классов, инженерно-геодезического нивелирования 1-го и 2-го разрядов, а также способов тригонометрического нивелирования, который показал, что при соблюдении ряда требований нивелирование III и IV классов может выполняться тригонометрическим методом;

– выполнен анализ результатов проведенных другими авторами исследований о влиянии вертикальной рефракции на точность тригонометрического нивелирования, который показал, что при длине визирного луча до 250 м это влияние существенно и оно должно учитываться при разработке методики государственного нивелирования III и IV классов;

– выполнены лабораторные и полевые исследования по определению СКО измерения превышения на станции методом тригонометрического нивелирования способом из середины. Исследованиями установлено, что при длине плеч нивелирования до 200 м превышение на станции может быть измерено с ошибкой не более 1,5–2,2 мм;

– выполнены исследования влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования, которые были использованы при разработке методики нивелирования III и IV классов. Учитывая величину влияния вертикальной рефракции на измеренные превышения, установлено максимальное неравенство плеч на станции, которое в солнечную погоду составляет 10 м для III класса и 20 м для IV класса, а в пасмурную погоду составляет 20 м и 30 м соответственно. Влияние рефракции в зимний период меньше, чем в летний, а измеренные превышения, как правило, больше истинных;

– усовершенствована методика тригонометрического нивелирования короткими лучами для выполнения государственного нивелирования III и IV классов, в соответствии с которой измерение превышения на станции производится двумя-тремя приемами способом из середины при длине визирного луча до 250 м. В качестве визирных целей рекомендуется использовать круглые отражатели либо отражательные пленки, наклеенные на рейки;

– предрасчетом точности установлено, что при измерении превышения на станции четырьмя приемами и длине визирного луча до 225 м нивелирные ходы III класса тригонометрическим методом между реперами высших классов могут прокладываться только в одном направлении, что повышает производительность работ практически в два раза;

– усовершенствована методика тригонометрического нивелирования 1-го и 2-го разрядов, использование которой позволяет увеличить предельный угол наклона визирного луча с  $3^\circ$  до  $12^\circ$ . Для достижения точности нивелирования 1-го разряда ( $m_{\text{нст}} = 0,15$  мм) необходимо ограничить длину визирного луча величиной 10 м, угол наклона – величиной  $8^\circ$ , а для нивелирования 2-го разряда ( $m_{\text{нст}} = 0,25$  мм) следует принять ограничения 25 м и  $12^\circ$  соответственно. В качестве визирных целей рекомендуется применять отражательные пленки, что приводит к повышению точности измерения расстояний и, соответственно, точности нивелирования;

– усовершенствованные методики тригонометрического нивелирования прошли апробацию при выполнении геодезических работ на ряде электростанций: Няганской ГРЭС, Череповецкой ГРЭС, Экибастузской ГРЭС-1, Рефтинской ГРЭС, Назаровской ГРЭС, Бийской ТЭЦ-1, Южно-Сахалинской ТЭЦ-1 и др. Производственные работы подтвердили правильность разработанных методик и программ наблюдений на станции;

– усовершенствована существующая локальная поверочная схема для средств измерения превышений путем добавления к рабочим средствам измерений электронных тахеометров. Предложена схема полевого высотного стенда для проведения поверок электронных тахеометров с целью определения их метрологических характеристик: СКО измерения превышения на станции и на 1 км двойного хода.

Результаты выполненных исследований будут рекомендоваться для внедрения их в геодезическое производство, а также, в перспективе, для внесения дополнений в существующие инструкции по выполнению государственного и инженерно-геодезического нивелирования. Дальнейшие исследования ЭТ должны проводиться с целью их применения в условиях значительных возмущающих воздействий.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом [Текст] / Г. А. Уставич, М. Е. Рахымбердина, А. В. Никонов, С. А. Бабасов // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22.

2 Создание геодезической основы на территории строительства объектов энергетики [Текст] / Г. А. Уставич, Г. Г. Китаев, А. В. Никонов, В. Г. Сальников // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 48–54.

3 Технологическая схема разбивки и установки круговых рельсовых путей [Текст] / Г. А. Уставич, Х. К. Ямбаев, В. Г. Сальников, А. В. Никонов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 66–69.

4 Никонов, А. В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины [Текст] / А. В. Никонов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 28–34.

5 Никонов, А. В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдений за осадками сооружений [Тест] / А. В. Никонов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 78–86.

6 Никонов, А. В. Исследование тригонометрического нивелирования в полевых условиях [Текст] / А. В. Никонов С. А. Бабасов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 71–78.

7 Никонов, А. В. Исследование точности измерения превышений электронным тахеометром высокой точности в полевых условиях [Текст] / А. В. Никонов, М. Е. Рахымбердина // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 1 (21). – С. 16–26.

8 Никонов, А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров [Текст] / А. В. Никонов // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35.

9 Никонов, А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины при визировании над разными подстилающими поверхностями [Текст] / А. В. Никонов // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 28–33.

10 Никонов, А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики [Текст] / А. В. Никонов // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 12–18.

11 Никонов, А. В. К вопросу о влиянии вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами [Текст] / А. В. Никонов // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 1 (25). – С. 12–26.

12 Никонов, А. В. Конструкция визирной цели для выполнения высокоточного тригонометрического нивелирования [Текст] / А. В. Никонов // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 2 (26). – С. 19–26.

13 Уставич, Г. А. Методика выполнения обратного тригонометрического нивелирования [Текст] / Г. А. Уставич, А. В. Никонов, С. А. Бабасов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 51–56.

14 Никонов, А. В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами в зимних условиях [Текст] / А. В. Никонов, А. А. Скворцов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 70–76.

15 Никонов, А. В. Технологические схемы при проложении ходов тригонометрического нивелирования [Текст] / А. В. Никонов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 77–82.

16 Уставич, Г. А. Совершенствование локальной поверочной схемы для проверки нивелиров и тахеометров [Текст] / Г. А. Уставич, А. В. Никонов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – С. 28–33.

17 Никонов, А. В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме [Текст] / А. В. Никонов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 43–53.