

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

*Антон Викторович Никонов*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и информационных систем, e-mail: [sibte@bk.ru](mailto:sibte@bk.ru)

*Садуахас Аяшович Бабасов*

ТОО «Технологический информационный центр» акимата г. Алматы, 050028, г. Алматы, пр. Достык, 85, директор, тел. 8(727)272-39-79, e-mail: [babasov@mail.ru](mailto:babasov@mail.ru)

В статье приведены результаты полевых исследований тригонометрического нивелирования методом из середины. Превышения в полигоне измерялись при разных условиях. Анализируя изменения невязки полигона, были выявлены наиболее влияющие на точность нивелирования факторы. На основе проведенных исследований сформулированы рекомендации по производству тригонометрического нивелирования методом из середины в равнинной местности.

**Ключевые слова:** тригонометрическое нивелирование, нивелирование тахеометром, высотные ходы, вертикальная рефракция.

## RESEARCH OF TRIGONOMETRIC LEVELING IN FIELD CONDITIONS

*Anton V. Nikonov*

Post-graduate student, Department of Engineering Geodesy and Information Systems, Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., e-mail: [sibte@bk.ru](mailto:sibte@bk.ru)

*Saduakhas A. Babasov*

Director, Technological Information Centre Akimata, 85 Dostyk Pr., Alma-Ata, 050028, phone: 8(727)272-39-79, e-mail: [babasov@mail.ru](mailto:babasov@mail.ru)

The results of the field research of trigonometric leveling by the method "from the middle" are presented. The polygon height differences were determined under different conditions. The polygon misclosure variations were analyzed, and the factors affecting the leveling accuracy revealed. Based on the research recommendations on trigonometric leveling by the method "from the middle" on the flat ground are given.

**Key words:** trigonometric leveling, tacheometer leveling, vertical refraction.

Тригонометрическое нивелирование методом «из середины» с применением современных высокоточных электронных тахеометров имеет перспективный характер. Во-первых, оно делает возможным производить работы без дополнительного комплекта инструментов (нивелир, рейка), а во-вторых, позволяет увеличить длину плеч нивелирования. Для изучения точностных возможностей тригонометрического нивелирования были проведены полевые исследования.

Полевые работы включают в себя проложение двух замкнутых нивелирных ходов с применением высокоточного тахеометра Leica TS-06 ( $m_z=2''$ ). Измерения проводились в два дня (16 июня и 1 июля 2012) на территории, прилегающей к Няганской ГРЭС. Местность равнинная, незначительно поросшая кустарником и травой, грунт песчано-глинистый.

Каждое превышение хода измерялось пятью полными приемами, данные заносились в память прибора. Порядок работы на станции следующий: измерения на заднюю точку при КЛ и КП, измерения на переднюю точку при КЛ и КП (что составляет один полный прием), второй прием начинается с визирования на заднюю точку. В качестве целей использовались стандартные призмённые отражатели SOKKIA, накрученные на веху. Цели в эксперименте имеют одну и ту же высоту (~1,66м), что достигалось выдвиганием обеих вех до гвоздя, забитого в стену. Вешки с отражателями устанавливались неподвижно по круглому уровню с помощью штативов и специально сделанных кронштейнов.

В качестве точек хода использовались: опоры линии электропередач, грунтовые репера, арматура забитая в землю. При установке вехи на опоре ЛЭП высота отражателя над землей составляет более 2 м.

Проложение хода 16 июня выполнялось в ясный солнечный день с 10:30 до 13:30. Погода безветренная, температура воздуха +24°C. Высота визирного луча над землей не менее 1,3 метров. Зенитные расстояния от 87,5 до 91°. Полигон состоит из 5 превышений и по сумме плеч составляет 756 метров. Неравенство плеч составляет от 3 до 6 метров. Средние длины линий визирования равны: 65, 60, 80, 112, 61 метр. На таких расстояниях от прибора до отражателя возможно уверенное наведение на цель.

В камеральной обработке использовались измеренные зенитные расстояния и наклонные расстояния до целей. Невязка полигона составила – 0,8 мм. Отклонение превышения между прибором и целью полученного из одного приема отличается от среднего из 5 приемов в 88% случаев не более чем на 0,7 мм, а в 58% случаев находится в пределах 0,3 мм. Наибольшие отклонения превышения от среднего из 5 приемов наблюдаются для максимальных расстояний в полигоне и составляют 1,4 мм. Второй ход тригонометрического нивелирования выполнялся 1 июля с 9:00 до 12:40 в солнечную, безоблачную погоду. Температура воздуха +25°C, безветренно. Данный полигон включает 4 превышения со средними длинами плеч 110, 170, 250, 330м (см. рис 1). Общая длина полигона по сумме плеч порядка 1450 м.

Превышение между точками нивелирования 2 и 3, а также 3 и 4 измерялось два раза при разных условиях наблюдений и неравенстве плеч (см. табл. 1).

Это делалось, чтобы выяснить от каких параметров при производстве тригонометрического нивелирования наиболее зависит точность измерений: от неравенства плеч, от качества изображения, от высоты визирного луча, от подстилающей поверхности. Хотя часть из этих параметров взаимосвязана. Так, при большей высоте визирного луча над подстилающей поверхностью изображение цели более спокойное.

Для вычисления превышения между двумя точками использовалась формула [1]:

$$h=D_{\text{П}} \cos z_{\text{П}} - D_{\text{З}} \cos z_{\text{З}}, \quad (1)$$

где  $D$  – наклонное расстояние;  $z$  – зенитное расстояние; индексы «П», «З» обозначают переднюю и заднюю цель соответственно.

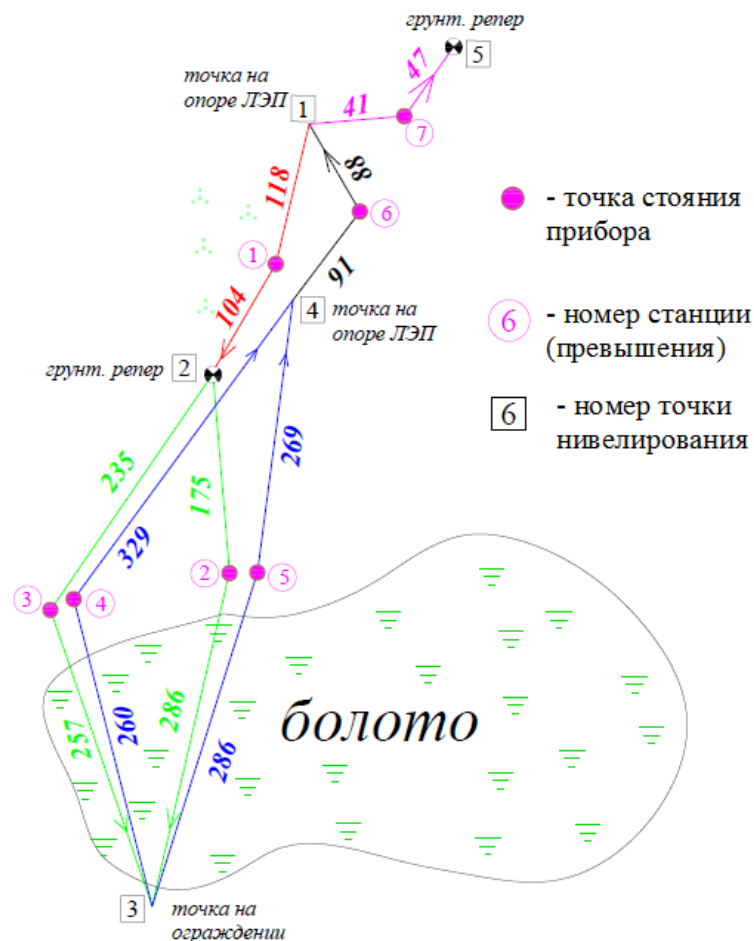


Рис. 1. Схема полигона тригонометрического нивелирования (1 июля 2012)

Таблица 1

Условия при нивелировании на станциях 2,3,4,5

№	№ прев. $h$	Условия в которых проводились измерения				
		Нерав. плеч, м	Качество изобр.*		Высота визир. луча над болотом, м	Положение прибора
			назад	вперед		
1	2	111	+	-	1,5-2	На солнце
2	3	22	+	+	3-3,5	В тени
3	4	69	+	+	3-3,5	В тени
4	5	17	-	+	1,5-2	На солнце

\* - качество изображения цели зависит от высоты прохождения визирного луча над болотом (на станциях 3 и 4 прибор находится на возвышенности)

В табл. 2 приведены невязки полигона при различных вариантах уравнивания (невязки подсчитаны по направлению против часовой стрелки).

Как видно из таблицы, при включении в уравнивание превышений с минимальным неравенством плеч (до 20 м) невязки в полигоне близки к нулю. Так, при накоплении неравенства плеч по полигону 22 м невязка составила +0,2 мм.

## Невязки полигона при различных вариантах уравнивания

№	Вариант уравнивания	$h$ без поправок	$h$ с поправкой за кривизну Земли	$h$ с поправкой за кр. Земли и рефракцию ( $\kappa=0,13$ )
1	<i>Min</i> нерав. плеч	+0,5	+0,2	+0,3
2	<i>Max</i> нерав. плеч	-18,7	-11,8	-11,0
3	$h_2$ в вычисл. (нерав. 111м)	-10,9	-7,9	-7,5
4	$h_4$ в вычисл. (нерав. 69м)	-7,3	-3,7	-3,2

При использовании в вычислениях превышений с максимальным неравенством плеч (69 и 111 м), даже с введением поправки за кривизну Земли невязка достигает значительной величины  $-11,8$  мм.

В дневное время, земная поверхность, поглощая солнечные лучи, нагревается и становится теплее прилегающих слоев воздуха. Температура убывает с высотой, т.е. градиент температуры отрицательный [2]. Вследствие этого, днем, превышения, полученные из одностороннего тригонометрического нивелирования получаются меньше истинных [3].

В данном ходе, в превышениях с большим неравенством плеч, заднее плечо короче переднего. Следовательно, рефракция окажет большее влияние на превышения при взгляде вперед, которые получатся меньше истинных. Согласно формуле (1), и общее превышение на станции получится уменьшенным, что и подтверждается отрицательными невязками полигона.

Таким образом, если бы в одном из превышений (4 или 2) сделать заднее плечо длиннее переднего, то влияние рефракции большей частью компенсировалось бы, и невязка полигона была бы мала, однако точка хода (№3) в таком случае будет иметь ошибочное значение высоты. Поэтому, если при проведении работ условия местности вынуждают производить измерения при большом неравенстве плеч, в одном из последующих превышений с аналогичными длинами линий визирования необходимо повторить такое же неравенство плеч (только сделать короче, например заднее плечо, а не переднее). Однако эту компенсацию необходимо произвести до того, как высотный ход пройдет через определяемую точку.

Также при обработке данных подсчитаны невязки, если в уравнивание включать сначала превышение с неравенством плеч 111 м (строка 3 таб.2), а затем 69 м (строка 4 таб.2). Известно, что в тригонометрическом нивелировании из-за рефракции ошибка возрастает пропорционально квадрату расстояния [4 с.197]. Из таблицы 2 следует, что уменьшение неравенства плеч в одном из превышений полигона в 1,6 раза (со 111 до 69 м) ведет к уменьшению невязки полигона в 2,1 раза (с  $-7,9$  до  $-3,7$  мм), что подтверждает нелинейную зависимость влияния рефракции от расстояния (невязка в данном случае практически полностью представляет собой ошибку в превышении с большим неравенством плеч) [14,16,17].

Таким образом, можно заключить, что при одинаковой длине плеч луч искривляется симметрично и влияние вертикальной рефракции большей частью исключается.

Введение поправки за рефракцию с использованием коэффициента рефракции +0,13 не имеет смысла, так как визирный луч в приземном слое воздуха изгибается выпуклостью вниз. Использование же какого-либо отрицательного коэффициента рефракции не может быть принято, в следствие неустойчивости температурного градиента вблизи поверхности земли. Так в [5, с. 81], на рейке были закреплены 3 датчика температуры на высоте 0,9 м ниже зрительной трубы прибора и выше ее на 0,9 и 1,9 м. Используя значения градиентов температуры, полученных из измерений нижнего и верхнего датчиков, были вычислены коэффициенты рефракции по формуле:

$$k = 502 \frac{P}{T^2} \left( 0,0341 + \frac{dT}{dh} \right), \quad (2)$$

где  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $dT/dh$  – температурный градиент.

Коэффициенты для двух разных точек составили  $k_1 = -1,37$  и  $k_2 = -2,13$ , что значительно отличается от используемого тахеометром значения +0,13 и подтверждает наши выводы.

Поскольку превышения с минимальными неравенствами плеч (невязка ~0) включают превышение 5, в котором изображение на точку №3 значительно колебалось можно сделать вывод, что влияние колебаний изображения цели носит случайный характер. В то же время, когда мы включаем в уравнивание одно превышение со значительным неравенством плеч (исправленное за кривизну Земли), невязка полигона отлична от нуля. Все вышесказанное, соответствует утверждению о том, что в рефракционной погрешности измерений две составляющих – регулярная и короткопериодическая [6, с. 155]. В данном случае сильное колебание изображения цели при визировании через болото, вызванное турбулентным движением воздуха, относится к короткопериодической составляющей рефракции, а некомпенсация влияния рефракции при большом неравенстве плеч, вызванная различным искривлением визирного луча при взгляде «назад» и «вперед», относится к регулярной составляющей вертикальной рефракции.

Как видно из рисунка 2, было измерено дополнительное превышение «7», чтобы связать между собой грунтовые репера. Превышение между реперами из тригонометрического нивелирования (2 станции) составило 508 мм (508,4 мм с поправкой за кривизну Земли). В каталоге даны отметки реперов с точностью до 1 мм. Разность отметок реперов из каталога составляет 508 мм, что подтверждает высокую точность нивелирования наклонным лучом при малых плечах.

Все полевые экспериментальные работы проводились одним исполнителем. Несмотря на невысокую производительность, в крайнем случае, возможно проложение короткого нивелирного хода (до 10 км) одним специалистом [12, 13, 15, 18].

Превышения измерялись пятью приемами, чтобы можно было проанализировать их отличие от среднего из пяти значений. Превышения были объединены в группы, результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Распределение отклонений превышений от среднего из 5 приемов

№	Интервал	90 – 130м	175 – 230м	260 – 300м	330м
1	Менее -2	0	1	3	0
2	От -2 до -1	0	0	4	1
3	От -1 до -0,5	1	3	2	2
4	От -0,5 до 0,5	18	3	3	1
5	От 0,5 до 1	1	1	3	0
6	От 1 до 2	0	2	8	0
7	Более 2	0	0	2	1
Σ	Всего прием.	20	10	25	5

Для расстояний порядка ста метра превышения между прибором и целью от приема к приему остаются одинаковыми в пределах 0,5 мм. Для расстояний около 200 м большей частью приемы не отличаются друг от друга более, чем на 1мм, однако некоторые расхождения могут достигать величин 2 и более мм. При плечах 300 м отличия превышений от среднего в основном находятся в интервале  $\pm 2$  мм и лишь редкие отклоняются на 3 – 5 мм. Из этого следует, что для расстояний до 200 – 230 м превышения достаточно измерять двумя полными приемами (для расстояний 100 м два приема необходимы для исключения грубых промахов в измерениях). При больших расстояниях целесообразно измерять превышение тремя приемами или использовать двойные наведения при количестве приемов 2.

Выводы: при проложении нивелирных ходов способом тригонометрического нивелирования из середины, определяющим фактором точности является соблюдение равенства плеч в пределах 20 м, при этом накопление неравенства плеч по секции не должно превышать 40 м. Современные электронные тахеометры имеют функцию ввода поправки за кривизну Земли. Используя данную функцию, возможно, брать в расчет превышения, выдаваемые прибором без ввода поправок в камеральных условиях. Колебания изображения цели, разная подстилающая поверхность при взгляде «назад» и «вперед» (при высоте визирного луча более 2м) не оказали заметного влияния на точность нивелирования [10, 11]. При проложении нивелирных ходов в равнинной местности, тригонометрическое нивелирование соответствует по точности геометрическому нивелированию III класса (исходя из невязок опытных полигонов).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пискунов М.Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений. – М.: Недра, 1980. – 248 с.
2. Дрок М.К. К вопросу о поправке в превышения за совместное влияние кривизны Земли и вертикальной рефракции при геодезическом нивелировании на малые расстояния // Научные записки ЛПИ. 1962. – № 7. – С. 3–30.

3. Дрок М.К. Точность определения превышений в ходах геодезического нивелирования короткими лучами в холмистой местности // Научные записки ЛПИ. 1962. – № 7. – С. 3–30.
4. Иордан, В. Руководство по высшей геодезии. Т.П. Прецизионное и тригонометрическое нивелирование / В. Иордан, О. Эггерт, М. Кнейсель. –М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 263 с.
5. Bill Teskey. Geodetic aspects of engineering surveys requiring high accuracy. – Canada, 1979. – 127 с.
6. Беспалов Ю.И., Терещенко Т.Ю. Лазерные маркшейдерско-геодезические измерения в строительстве. – СПб., 2010. – 227 с.
7. Пискунов М.Е., Нгуен Ван Дау. Метод высокоточного тригонометрического нивелирования короткими (до 100 м) лучами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1971. – № 6. – С. 37–48.
8. Беспалов Ю.И., Мирошниченко С.Г. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами // Геодезия и картография. – 2009. – № 3. – С. 12–13.
9. Беспалов Ю.И., Дьяконов Ю.П., Терещенко Т.Ю. Наблюдение за осадками зданий и сооружений способом тригонометрического нивелирования // Геодезия и картография. – 2010. – № 8. – С. 8–10.
10. Скрипников В.А., Скрипникова М.А. Технологическая схема геодезического обеспечения реконструкции гидрогенератора // // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 46–52.
11. Хорошилова Ж.А., Хорошилов В.С. Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 77–80.
12. Прогноз деформаций с использованием функций показательного многочлена / В.А. Середович, Р. Эхигиатор-Иругхе, О.М. Эхигиатор, Х. Ориакхи // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 148–155.
13. Сальников В.Г. Геодезические работы при возведении градирен большой высоты // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 72–77.
14. Скрипников В.А., Скрипникова М.А. Совершенствование схем планового обоснования для определения горизонтальных смещений гидротехнических сооружений // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 97–100.
15. Басаргин А.А. Анализ деформаций фундаментов промышленных сооружений с применением геостатистических методов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 201–206.
16. Басаргин А.А. Вариограммный и ковариационный анализ результатов наблюдений за осадками фундаментов инженерного сооружения // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 13–18.
17. Лесных Н.Б., Лесных Г.И., Малиновский А.Л. Предельные ошибки измерений // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 26–32.
18. Результаты комплексных геодезическо-гравиметрических наблюдений на геодинамическом полигоне Спорышевского месторождения / В.А. Середович, А.И.

Каленицкий,

Э.Л. Ким, М.Д. Козориз // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 12–15.

© А.В. Никонов, С.А. Бабасов, 2013