

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ КОРОТКИМИ ЛУЧАМИ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Антон Викторович Никонов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, e-mail: sibte@bk.ru

Александр Андреевич Скворцов

ОАО «Сибтехэнерго», 630032, Россия, г. Новосибирск, ул. Планировочная, 18/1, инженер-геодезист, e-mail: skv.a.a@mail.ru

В статье на основе опытных данных оценивается величина влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими (до 200 м) лучами в зимних условиях. Вычисляется коэффициент рефракции и даются рекомендации по выполнению нивелирования наклонным лучом.

Ключевые слова: тригонометрическое нивелирование, тахеометр, рефракция, точность.

THE ANALYSIS OF VERTICAL REFRACTION INFLUENCE ON THE RESULTS OF TRIGONOMETRIC LEVELING WITH SHORT LENGTHS OF SIGHT IN WINTER CONDITIONS

Anton V. Nikonov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph.D. student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, e-mail: sibte@bk.ru

Alexander A. Skvortsov

JSC «Sibtechenergo», 18/1, 630032, Russia, Novosibirsk, Planirovochnya St., engineer surveyor, e-mail: skv.a.a@mail.ru

The effect of vertical refraction changes on trigonometric leveling with short lengths of sight (up to 200 m) is estimated basing on experimental data. The present study deals with the short-term fluctuation of the refraction coefficient k by means of unidirectional vertical angle measurements using total station. The recommendations for trigonometric height traversing is given.

Key words: trigonometric leveling, total station, refractive index, accuracy.

В геодезическом производстве встречаются случаи, когда требуется выполнить нивелирные работы в зимних условиях: при проложении высотных ходов в заболоченной местности или при работе на строительной площадке. В предыдущих наших исследованиях [1-4] мы пришли к выводу, что тригонометрическое нивелирование короткими (50 – 300 м) лучами вполне может конкурировать по точности с геометрическим нивелированием III – IV классов, при этом длина визирного луча может быть увеличена в два раза. Тем не менее, влияние вертикальной рефракции может заметно исказить

результаты тригонометрического нивелирования [5]. Например, в летний период, результаты одностороннего тригонометрического нивелирования при визировании на расстоянии 400 м могут содержать систематическую ошибку $\Delta = -40$ мм [6]. Из работы [7] известно, что зимой, в момент касания солнцем горизонта, коэффициенты рефракции, полученные из двухсторонних наблюдений на линиях длиной 200 м и 762 м, могут соответственно достигать значений +6,92 и +2,11. Однако в исследованиях [8, 9] делаются выводы, о том, что не следует производить измерения в течение 1,5-2 часов после восхода и до захода солнца. В этой связи наибольший интерес представляет характер влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования в дневной период зимой. Для исследования этого вопроса мы провели полевой эксперимент в городе Новосибирске, 16 января 2014г, при $t = -3^{\circ}\text{C}$ и переменной облачности.

В ходе эксперимента на расстоянии 170 м друг от друга были установлены два штатива с трегерами и адаптерами. Ножки штативов плотно вдавливались в мерзлый грунт и присыпались снегом. В дальнейшем стабильность штатива подтвердилась неподвижностью пузырька электронного уровня тахеометра.

Между верхними частями адаптеров было измерено превышение путем проложения хода геометрического нивелирования с использованием цифрового нивелира DiNi0.3 и комплекта инварных реек. Короткая рейка (1 м) устанавливалась непосредственно на адаптер, как показано на рис. 1. Превышение определялось до и после основной части опыта (табл. 1).

В дальнейшем на один из адаптеров был установлен отражатель, а другой заменен электронным тахеометром Leica TS-02. В течение часа непрерывно выполнялись односторонние измерения превышения (1 серия), затем с перерывом в полчаса была выполнена вторая серия наблюдений продолжительностью 30 минут. После этого, тахеометр и адаптер с отражателем менялись местами, и производилась третья серия измерений продолжительностью 30 минут.



Рис. 1. Постановка рейки на адаптер

Таблица 1

Результаты геометрического нивелирования

Ход	h , мм	$h_{\text{ср}}$, мм	Время
Прямо	-3970,13	-3970,47	12:30
Обратно	+3970,81		15:50
Δ , мм	-0,68		

Если принять среднее значение превышения из прямого и обратного ходов геометрического нивелирования h_{cp} за истинную величину, то возможно найти ошибку каждого измеренного тахеометром превышения:

$$\Delta = h_{Ti} - h_{cp}, \quad (1)$$

где h_{Ti} – значение превышения из тригонометрического нивелирования, измеренного полным приемом (при КЛ и КП); $h_{cp} = 3970,47$ мм – значение превышения из геометрического нивелирования. Найденные отклонения представлены в графической форме на рис. 2 (а, б, в – для 1, 2, 3 серий измерений соответственно).

Из графиков на рис. 2 видно, что в зимний период, при прохождении визирного луча над снежным покровом на высоте $0,7 \div 2$ м, превышения из односторонних наблюдений в основном больше истинного значения на $1 - 3$ мм ($1,2 - 3,6''$). Лишь в период с 13:40 – 14:00 превышения оказались меньше истинного значения на $\sim 1''$. На рис.2 также представлены линии тренда, полученные путем аппроксимации графиков с применением полиномиальной функции 6-ой степени. Линии тренда имеют волнообразный характер, с различной частотой и амплитудой, что по видимому соответствует изменению метеорологических условий (особенно в погоду с переменной облачностью).

В автореферате [9] представлены графики ошибок зенитных расстояний измеренных зимой на линиях длиной от 100 до 300 м. Для линии длиной 200 м ошибки с 11 до 16 часов увеличиваются с $3''$ до $6''$. Из результатов работы [9] и графиков (рис.2), следует, что зимой измеренные превышения больше истинных на величины $\sim 1'' \div 5''$ (для $d \approx 200$ м), в зависимости от времени дня и местных условий.

В табл. 2 представлены результаты тригонометрического нивелирования по трем сериям измерений с учетом поправки за кривизну Земли ($h_{ЗЕМ}$). Средняя квадратическая ошибка (СКО) $m_{внутр}$, найденная по формуле Бесселя по всем измерениям внутри серии, содержит ошибку, вызванную изменением рефракции с течением времени, так как серия выполняется за период продолжительностью 0,5–1 часа.

Для того, чтобы оценить случайное влияние рефракции ($m_{z p}$) воспользуемся формулой [10]:

$$m_{z p} = \sqrt{m_{внутр}^2 - m_{z и}^2}, \quad (2)$$

где $m_{внутр}$ – СКО измерения зенитного расстояния, найденная по формуле Бесселя (по внутренней сходимости); $m_{z и}$ – инструментальная СКО измерения зенитного расстояния, найденная по формуле (3).

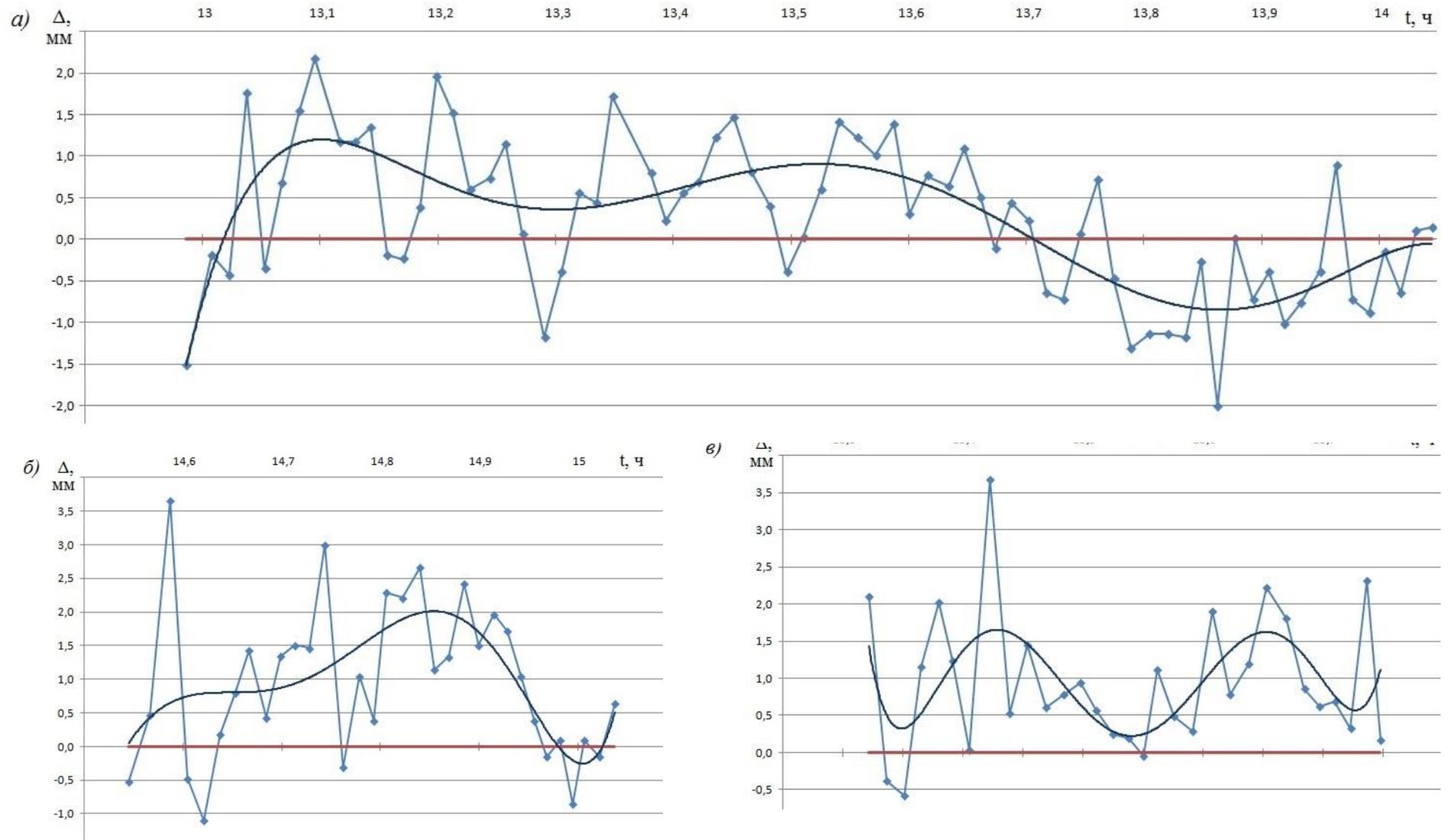


Рис. 2. Графики отклонений превышений из одностороннего тригонометрического нивелирования от превышения из геометрического нивелирования

Таблица 2

Результаты одностороннего тригонометрического нивелирования

№ точки	Количество приемов, n	$h_{\text{ЗЕМ}}$, мм	$\Delta = h_{\text{ЗЕМ}} - h_{\text{ИСТ}}$, мм	Время измерений (местное)	$\Delta h = h_{\text{max}} - h_{\text{min}}$, мм / "	$m_{\text{ВНУТР}}$, мм / "
Т.1	72	-3 970,2	+0,3	12:59 – 14:03	4,2 / 5,1	0,9 / 1,1
Т.1	33	-3 969,5	+1,0	14:32 – 15:02	4,8 / 5,8	1,1 / 1,3
Т.2	31	+3 971,4	+0,9	15:16 – 15:42	4,3 / 5,2	0,9 / 1,1

Пренебрегая изменением рефракции за промежуток времени между соседними измерениями, инструментальная ошибка может быть вычислена по формуле:

$$m_{z \text{ и}} = \sqrt{\frac{[d^2]}{2(n-1)}} , \quad (3)$$

где d – разность между значениями превышений из смежных приемов; n – число измерений.

Значения ошибок, найденные по формулам (2), (3) представлены в табл.3.

Таблица 3

Результаты оценки точности тригонометрического нивелирования, мм

№ серии	Количество приемов, n	$m_{\text{ВНУТР}}$	* $m_{\text{ИСТ}}$	$m_{z \text{ и}}$	$m_{z \text{ р}}$
1	72	0,92	0,95	0,61	0,69
2	33	1,15	1,15	0,97	0,61
3	31	0,91	1,32	0,95	0,91

* $m_{\text{ИСТ}}$ – СКО вычисленная по отклонениям из данных геометрического нивелирования

Из табл.3 видно, что СКО измерения превышения в зимних условиях не превосходит 1,5 мм (1,8") для $d = 170$ м, а ошибка случайного влияния рефракции не превышает 0,9 мм (1,1"), что согласуется с данными статьи [10].

Используя средние по серии значения зенитных расстояний, были вычислены коэффициенты рефракции k (по известным формулам из [11]) и соответствующие им ошибки зенитных расстояний δz (табл. 4).

Таблица 4

Опытные значения коэффициентов рефракции

	k	$\delta z,$ "
С точки Т.1 (1 серия)	+0,09	+0,3
С точки Т.1 (2 серия)	+0,41	+1,1
С точки Т.2 (3 серия)	+0,41	+1,1
По взаимным наблюдениям	+0,33	+0,9

Значения коэффициентов рефракции, найденные по данным близких друг к другу по времени получасовых серий измерений согласуются между собой. Однако следует иметь в виду, что точность определения коэффициентов рефракции на коротких линиях сильно зависит от точности превышения из геометрического нивелирования, при использовании формулы [11]:

$$k = 1 - \frac{2R}{d^2} (h - d \cos z), \quad (4)$$

где R – радиус Земли (6371 км); h – превышение из геометрического нивелирования; d – расстояние между точками. Поэтому ошибки вычисленных коэффициентов рефракции сравнимы с их величинами.

Значение превышения, вычисленное по результатам одновременных двухсторонних измерений $h_T = 3970,62$ мм, отличается от результатов геометрического нивелирования (табл.1) всего на 0,15 мм.

По результатам выполненных исследований можно сделать выводы:

1. В зимний период, измеренные методом тригонометрического нивелирования превышения, как правило, имеют положительные ошибки.

2. Значения коэффициентов рефракции в зимний период (исключая 1,5 – 2 часа близкие к восходу и заходу солнца) незначительно отличаются от значения полученного Гауссом ($k=+0,13$), в отличие от летнего периода, и имеют знак «плюс».

3. Тригонометрическое нивелирование, выполняемое в зимних условиях, может соответствовать по точности геометрическому нивелированию III – IV классов. При этом одновременные двухсторонние наблюдения с несинхронностью 10 – 30 минут, в основном, свободны от систематического влияния рефракции. При нивелировании способом из середины можно увеличить допуск на неравенство плеч, предложенный в статье [6], до 40 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никонов А. В., Бабасов С. А. Исследование тригонометрического нивелирования в полевых условиях // 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.
2. Никонов А. В., Рахымбердина М. Е. Исследование точности измерения превышений электронным тахеометром высокой точности в полевых условиях // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 1 (21). – С. 16–26.
3. Никонов А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35.
4. Никонов А.В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины при визировании над разными подстилающими поверхностями // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 28–33.
5. Hirt C., Guillaume S., Wisbar A., Bürki B. and Sternberg, H. Monitoring of the refraction coefficient of the lower atmosphere using a controlled set-up of simultaneous reciprocal vertical angle measurements // Journal of Geophysical Research (JGR).–2010.–115, D21102.
6. Никонов А. В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 28–34.
7. Менухов И. И. Из опыта тригонометрического нивелирования зимой // Геодезия и картография. – 1974. – № 9. – С. 20–21.
8. Дрок М. К. Исследование точности определения превышений в ходах геодезического нивелирования на короткие расстояния в равнинной местности // Научные записки ЛПИ. 1961. – №6. – С.183–199.
9. Редьков В. С. Применение современных оптических теодолитов при трассировании железных дорог в Сибири : автореф. дис. канд. техн. наук / В. С. Редьков. – Новосибирск : НИИЖТ, 1969. – 23 с.
10. Менухов И. И. О точности измерения зенитных расстояний зимой // Геодезия и картография. – 1980. – № 2. – С. 32–33.
11. Иордан В., Эггерт О., Кнейссль М. Руководство по высшей геодезии. Ч. II. Прецизионное и тригонометрическое нивелирование – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 263 с.

© А. В. Никонов, А. А. Скворцов, 2014