

УДК 528.37/.38

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ КОРОТКИМИ ЛУЧАМИ

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

В статье на основе опытных данных оценивается величина влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими (до 200 м) лучами способом из середины. Вычисляются коэффициенты рефракции и даются рекомендации по выполнению нивелирования наклонным лучом.

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

ABOUT VERTICAL REFRACTION INFLUENCE ON THE RESULTS OF LEAP-FROG TRIGONOMETRIC LEVELING WITH SHORT LENGTHS OF SIGHT

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

The effect of vertical refraction changes on leap-frog trigonometric leveling with short lengths of sight (up to 200 m) is estimated basing on experimental data. The refractive index is calculated. The recommendations for leap-frog trigonometric leveling is given.

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

На территории нашей страны основным методом построения и развития высотной основы является геометрическое нивелирование [1]. Тригонометрическому нивелированию отводится второстепенное место. Например, в соответствии с Руководством [2] и Инструкцией [3] при топографических съемках с сечением рельефа 2 и 5 м в качестве высотной основы разрешается использовать пункты, высоты которых определены техническим или тригонометрическим нивелированием. Там уже указывается допустимое расхождение между прямым и обратным превышениями из двух независимых передач:

$$\text{пред } dh = 4(\text{см}) \frac{S(\text{м})}{100}. \quad (1)$$

При этом в Инструкции [3] применение тригонометрического нивелирования подразумевается при передаче высот в сетях триангуляции или полигонометрии, а в Руководстве [2] кроме этого рассматривается тригонометрическое нивелирование при проложении основных и съемочных высотных ходов с оптимальными длинами сторон 150–1 000 м (в зависимости от метода измерения

расстояния). В обоих случаях точность передачи высоты на расстояние 1 км составляет несколько сантиметров.

Возможность проложения высотных теодолитных ходов для достижения точности технического нивелирования ($f_{\text{доп}} = 50\sqrt{L}$ мм) обосновывается в Руководстве [4]. В проекте актуализированной редакции СНиП 11-02-1996 для тригонометрического нивелирования указаны допуски: для различий между превышениями двойного хода – $f_h < 50 \sqrt{2L}$ мм; для невязки ходов и замкнутых полигонов – $f_h < 50\sqrt{L}$ мм. В статье [5] были проанализированы разности прямых и обратных превышений по сторонам ходов тригонометрического нивелирования (всего 2 434 линии). Из анализа следует, что для 75–80 % сторон с длинами 70–150 м разность прямых и обратных превышений находится в допуске ($50 \text{ мм}\sqrt{2L}$). Для остальных длин линий (вплоть до 1 000 м) только ~55 % разностей не превышает допуска.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что тригонометрическое нивелирование, даже с внедрением в геодезическое производство современных тахеометров ($m_z = 2\text{--}5''$ и $m_s = 2\text{--}5$ мм), применяется при проложении ходов лишь технической точности, несмотря на возможности достижения точности нивелирования III и IV классов. Например, в статье [6] представлены результаты двухстороннего тригонометрического нивелирования. При проложении высотных ходов длиной ~1,5 км со сторонами 200–500 м ошибки не превысили 8 мм. В работе [7] в основном исследуется нивелирование наклонным лучом способом «из середины». Для длин плеч ~200 м ошибки взаимного положения пунктов по высоте, удаленных на расстояние 800 м друг от друга, в большинстве случаев не превысили 1,8 мм. Наши исследования также подтверждают возможность применения тригонометрического нивелирования при проложении ходов III и IV классов точности [8–11]. Однако это потребует совершенствования методики тригонометрического нивелирования, которая в большей мере определяется влиянием вертикальной рефракции.

Заметный вклад в изучение влияния рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами внесли исследователи из Львовского политехнического университета [12, 13]. Из их исследований следует, что значение коэффициента рефракции в приземном слое атмосферы может колебаться в течение дня в заметных пределах: от +4,28 до –4,40, и большей частью имеет знак «минус».

Задача наших исследований: определить величину влияния рефракции при нивелировании короткими лучами и установить допуски на неравенство плеч на станции и на накопление неравенства по секции при выполнении нивелирования короткими (до 200 м) лучами.

В ходе эксперимента на расстоянии ~200 м друг от друга были установлены два штатива с трегерами и адаптерами фирмы Leica. Превышение между адаптерами было найдено из высокоточного геометрического нивелирования II класса, при этом рейка устанавливалась непосредственно на адаптер (рис. 1).



Рис. 1. Схема постановки нивелирной рейки на адаптер

Разность превышений из прямого и обратного ходов составила 0,2 мм, а среднее значение – 263,30 мм, которое было принято за истинное.

После этого на адаптеры были установлены одинаковые отражатели, превышение между горизонтальными осями которых определялось тахеометром Leica TS-06 ($m_z = 2''$) с пяти разных станций (рис. 2). Измерения выполнялись 12 сентября 2013 г (13:40–15:27) в солнечную погоду при температуре воздуха +18 °С и ветре ~8 м/с в Тюменской области.

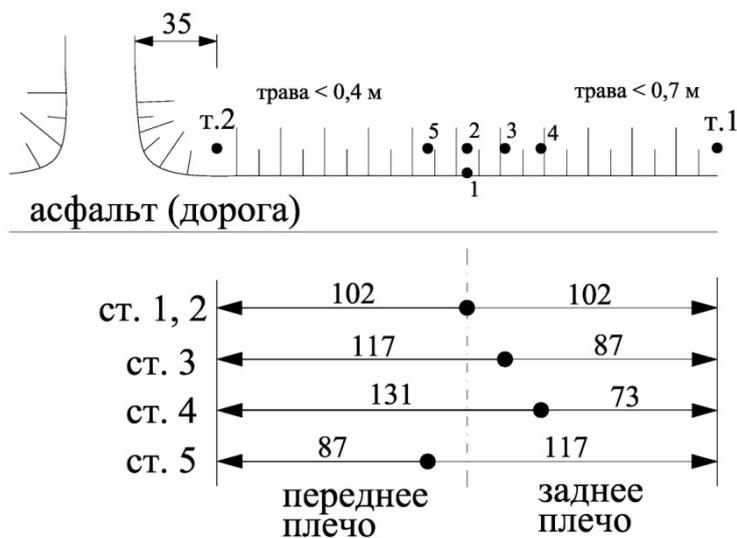


Рис. 2. Схема установки тахеометра при выполнении нивелирования (все расстояния указаны в метрах)

При работе на станциях 1 и 2 неравенство плеч не превышало 1 м, на станциях 3 и 5 составило 30 м, и на станции 4 – 58 м. Превышение h между двумя целями (т. 1 и т. 2) находилось по известной формуле:

$$h = h_{\text{п}} - h_{\text{з}} = D_{\text{п}} \cos z_{\text{п}} - D_{\text{з}} \cos z_{\text{з}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{п}}$ и $h_{\text{з}}$ – превышения между осью вращения зрительной трубы и целями; D – наклонное расстояние; z – зенитное расстояние; индексы «п», «з» обозначают переднюю и заднюю цели соответственно.

Результаты измерений и оценки точности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки точности измеренных превышений

№ ст.	n приемов	Неравен. плеч, м	$m_{\text{з}}$, с	$m_{\text{п}}$, с	$m_{\text{внутр}}$, мм	$m_{\text{ист}}$, мм	Δ_h , мм	$h_{\text{ср}}$, мм	$h_{\text{зем}}$, мм	$\Delta = h_{\text{ист}} - h_{\text{зем}}$, мм	$\Delta_{\text{доп}} = 3M$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	15	0,7	1,4	2,2	1,4	1,5	5,2	262,97	262,96	0,34	1,3
2	10	0,4	5,9	1,6	2,4	4,6	8,6	266,96	266,96	-3,66	2,3
3	10	30,1	6,2	3,0	1,9	2,1	6,0	262,52	263,00	0,30	1,8
4	10	58,6	4,2	3,3	1,3	6,5	4,6	257,20	258,14	5,16	1,2
5	10	28,7	3,7	2,1	2,2	6,5	7,1	269,06	268,60	-5,30	2,1
Ср.			4,3	2,4	1,8		6,3	263,74	263,93		

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

$m_{\text{з}}$ и $m_{\text{п}}$ – средние квадратические ошибки (СКО) измерения превышений $h_{\text{з}}$ и $h_{\text{п}}$ соответственно (в угловой мере);

$m_{\text{внутр}}$ и $m_{\text{ист}}$ – СКО определения превышения h между двумя целями. Первая величина найдена по отклонениям от среднего по серии значения превышения (внутренняя сходимость), вторая величина вычислена по отклонениям от значения превышения, принятого за истинное. Все СКО определены по формуле Бесселя;

Δ_h – интервал, в котором находятся превышения по серии ($\Delta_h = h_{\text{max}} - h_{\text{min}}$);

$h_{\text{ср}}$ – значение превышения, вычисленное как среднее по серии из n приемов;

$h_{\text{зем}}$ – превышение $h_{\text{ср}}$ с учетом поправки за кривизну Земли;

Из табл. 1 видно, что СКО измерения превышения $h_{\text{з}}$ практически в два раза больше, чем для $h_{\text{п}}$. Это вызвано заметным размытием и колебанием изображения цели т. 1, что, в свою очередь, может быть связано с более высокой растительностью в районе задней цели.

Среднюю квадратическую ошибку измерения зенитных расстояний m_z по данным проведенного эксперимента можно найти как

$$m_z = \frac{m_3 + m_{\Pi}}{2} = 3,3 \text{ ''}.$$

Так как количество добавочных измерений в серии $r < 20$, решим задачу оценки точности и надежности подходящего значения теоретической средней квадратической ошибки σ , используя распределение χ^2 [14]. Для $n = 10$ с доверительной вероятностью 0,95 можно утверждать, что стандарт находится в пределах:

$$2,3'' < \sigma < 6,0''.$$

Таким образом, фактическая точность измерения зенитного расстояния даже для коротких длин визирования при заметном влиянии внешних условий может достигать заметных значений, но в конкретном случае не превосходит величины $3m_z$ (6'').

Для правильной интерпретации разностей из столбца 11 найдем их СКО и перейдем к предельным ошибкам. В расчетах примем превышение, полученное из геометрического нивелирования, безошибочным. Тогда СКО среднего по серии превышения равна

$$M = \frac{m_{\text{внутр}}}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

а величина допустимого интервала

$$\Delta_{\text{доп}} = 3M. \quad (3)$$

Из сравнения полученных разностей Δ с их допустимыми значениями $\Delta_{\text{доп}}$ следует, что для станций 2, 4, 5 истинные ошибки среднего по серии значения превышения превосходят установленный допуск и, вероятно, вызваны систематическим влиянием вертикальной рефракции. На этих станциях $m_{\text{внутр}}$ и $m_{\text{ист}}$ не согласуются между собой.

Из табл. 1 можно сделать еще ряд выводов.

1. Превышение h , измеренное строго из середины на станции 1, практически безошибочно, так как высота визирного луча в этом случае более 1,5 м, а подстилающая поверхность вблизи прибора, установленного на обочине – песок. При установке прибора на откосе (станция 2), нагреваемом солнцем, высота визирного луча меньше, а подстилающей поверхностью выступает трава. Вследствие этого превышение h содержит систематическую ошибку, а изображение цели т. 1 заметно размыто. Можно предположить, что тахеометр, при установке его на откосе, находится во влиянии перегретых слоев воздуха, которые характерны скорее для высоты ~ 1 м над землей (рис. 3). На рис. 3 пунктиром показана возможная стратификация слоев воздуха с одинаковой температурой, которая убывает с увеличением высоты по нелинейной зависимости.

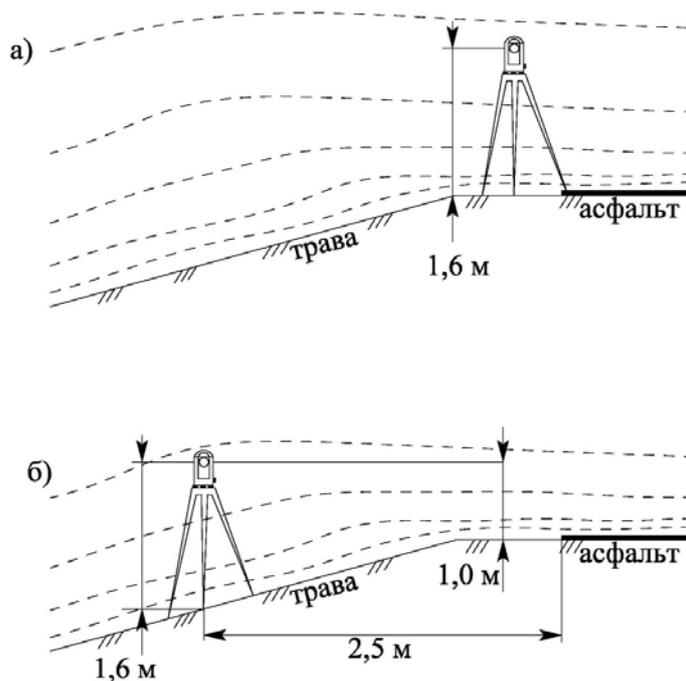


Рис. 3. Схема установки тахеометра:
 а) на станции 1; б) на станциях 2–5

2. Ошибка Δ определения превышения h между т. 1 и т. 2 при нивелировании из середины, даже для коротких длин плеч (~ 100 м) в экстремальных условиях может достигать 3,5 мм, а при неравенстве плеч 30 и 60 м – более 5 мм.

3. Ошибки $m_{\text{внутр}}$ показывают хорошую сходимость выполненных в каждой серии измерений и составляют величины порядка 2 мм. Данные ошибки не превосходят $2m_h$ (при нивелировании из середины $2m_h = 2\sqrt{1^2+1^2} = 2,8$ мм). Ошибка $m_{\text{внутр}}$ определяется величинами ошибок m_z и $m_{\text{п}}$, которые, в свою очередь, зависят от влияния короткопериодической составляющей рефракции. В период неустойчивой стратификации припочвенного слоя атмосферы образуются быстро колеблющиеся турбулентные потоки воздуха с небольшими колебаниями температур, что приводит к непостоянству коэффициента преломления воздуха и, как результат, – к колебанию изображений целей. Как видно из табл. 1, $m_z > m_{\text{п}}$, что связано с низким качеством изображения цели т. 1. Очевидно, для станции 1 ошибка $m_{\text{внутр}}$ минимальна, а для станций, с которых изображение цели т. 1 наиболее расплывчатое (2 и 5), эти ошибки максимальны.

4. Знак разностей в столбце 11 (табл. 1) определяется величиной рефракционного искажения при взгляде на заднюю и переднюю цели:

$$\text{если } r_z - r_{\text{п}} > 0, \text{ то } h_{\text{ист}} - h_{\text{зем}} < 0;$$

$$\text{если } r_z - r_{\text{п}} < 0, \text{ то } h_{\text{ист}} - h_{\text{зем}} > 0,$$

где r_z и $r_{\text{п}}$ – рефракционные ошибки при взгляде на заднюю и переднюю цели соответственно (взяты по модулю) [15].

Для станции 2, $h_{ист} - h_{зем} < 0$, т. е. большему рефракционному искажению подвержены измерения на цель т. 1, что связано с различными микроклиматическими условиями, в которых оптический луч проходит при визировании на заднюю и переднюю цели, и подтверждается расплывчатым и колеблющимся изображением цели т. 1. При нивелировании не из середины большему влиянию рефракции подвергнется более длинная сторона, поэтому для станции 5 разность Δ – отрицательная, а для станции 4 – положительная.

5. На станции 3 произошла компенсация рефракционных ошибок. Значит, если при нивелировании способом «через точку» одно из направлений (заднее или переднее) подвержено большему рефракционному искажению, чем другое (что определяется разным качеством изображения целей), уменьшение длины плеча этого направления может привести к исключению регулярной составляющей рефракционной ошибки в превышении h .

Несимметричные условия прохождения визирного луча при взгляде «назад» и «вперед» также подтверждаются несоответствием абсолютных ошибок, полученных на станциях 3 и 5 – равноудаленных от середины профиля. Для профиля местности с однородными условиями эти ошибки должны быть практически равны по модулю и иметь разный знак, но в нашем случае они различаются по абсолютной величине на 5 мм. Одной из причин столь заметного различия превышений может быть и изменение коэффициента рефракции, который в данных погодных условиях, согласно [16], за 10–30 минут может измениться на 1–1,5.

По данным одновременных взаимных измерений с точек т. 1 и т. 2 были вычислены фактические коэффициенты рефракции. Для установки тахеометра на крайних точках профиля из трегера вынимался адаптер, а после установки прибора в трегер положение подъемных винтов не изменялось, так как прибор располагался достаточно отвесно, в пределах работы компенсатора. Результаты измерений с конечных точек профиля представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты взаимных одновременных измерений (12.09.13)

№ точки	Количество приемов, n	$h_{зем}$, мм	$\Delta = h_{ист} - h_{зем}$, мм	Время измерений (местное)	$\Delta_h = h_{max} - h_{min}$, мм / "	$m_{внутр}$, мм / "
т. 1	19	+201,41	+61,89	15:35 – 15:48	35 / 35	8,0 / 8,0
т. 2	30	-286,97	+23,67	15:56 – 16:13	18 / 18	5,3 / 5,3

При производстве измерений на точке т. 1 наблюдались сильное размытие изображения цели (т. 2) и его дрожание, а наведения на отражатель носили приближенный характер. В связи с этим количество измерений было ограниче-

но 19 приемами, а СКО превысила предельное значение ($3m_z = 6''$). Несмотря на наблюдения низкой точности со станции т. 1, из табл. 2 следует, что прямое и обратное превышения подвержены различному систематическому влиянию вертикальной рефракции, так как $\Delta_{т.1}$ более чем в 2,5 раза превышает значение величины $\Delta_{т.2}$. Разность между истинным значением превышения и результатом двухстороннего нивелирования составляет 19,1 мм.

Из табл. 2 также следует, что траектория оптического луча обращена выпуклостью вниз, так как превышения из одностороннего нивелирования меньше истинного значения. Атмосфера в данном случае считается неустойчивой, и в ее приземном слое наблюдаются заметные флуктуации температуры.

По данным одновременных двусторонних измерений с точек т. 1 и т. 2 нами были вычислены коэффициенты рефракции по формуле [17]:

$$k = 1 - \frac{R(z_1 + z_2) - 180^\circ}{D \rho}. \quad (4)$$

Также коэффициенты k были найдены по данным односторонних измерений с привлечением результатов геометрического нивелирования по формуле [17]:

$$k = 1 - \frac{2R}{D^2} (h - D \cos z), \quad (5)$$

где R – радиус Земли (6 371 км); h – превышение из геометрического нивелирования.

По найденным коэффициентам рефракции были вычислены температурные градиенты по формуле А. А. Изотова и Л. П. Пеллинен:

$$\kappa = 668,7 \frac{P}{T^2} \left(0,0342 + \frac{dT}{dh} \right), \quad (6)$$

где κ – точечный коэффициент рефракции; P – давление воздуха в мм рт. ст.; T – абсолютная температура в К; $\frac{dT}{dh}$ – вертикальный градиент температуры в градусах на метр. Кроме того, были вычислены рефракционные ошибки δz в угловой мере. Результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Опытные значения коэффициентов рефракции (12.09.13)

	k	dT/dh , град/м	δz , ''
С точки т. 1	-19,0	-3,22	65,7
С точки т. 2	-7,2	-1,24	20,9
По взаимным наблюдениям	-13,1		

Так как измерения с т. 1 выполнялись в крайне неблагоприятных условиях, значение $k_1 = -19,0$ определено ненадежно. Величина $k_2 = -7,2$ также не характерна для высоты прибора $\sim 1,6$ м. С учетом температурных измерений, в работе [18] определены экстремальные значения коэффициентов рефракции в непосредственной близости от земли: от -47 до $+20$. На высоте 50 см коэффициенты рефракции могут изменяться в пределах от -8 до $+16$ в солнечные дни [19] и на высоте нескольких дециметров – от -6 до -10 [15]. Вероятно, вычисленные нами экстремальные значения коэффициентов связаны с особенностью установки прибора на откосе (рис. 3).

Аналогичный опыт в той же местности был проведен 1 октября в других погодных условиях: $t = 0^\circ\text{C}$, облачно, небольшой снег. В этом опыте на профиле было установлено три штатива с трегерами (т. 1, т. 2, т. 3), как указано на рис. 4.

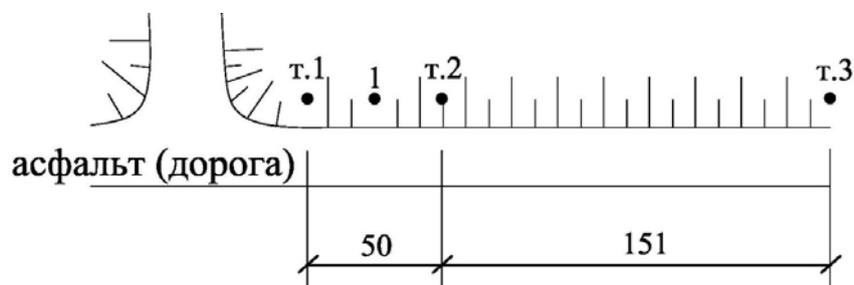


Рис. 4. Схема установки целей и тахеометра

Три штатива с трегерами и адаптерами были установлены в точках: т. 1, т. 2, т. 3, а измерения на станции 1 выполнены с четвертого штатива (без адаптера).

Данные измерений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений (1.10.13)

С точки	На точку	Приемов, n	$h_{земь}$, мм	$h_{ист}$, мм	$\Delta = h_{ист} - h_{земь}$, мм
т. 3	т. 2	25	+218,02	218,36	0,34
	т. 1	25	-117,60	-117,44	0,16
т. 1	т. 3	20	+116,26	+117,44	1,18
	т. 2	20	+336,88	+335,79	-1,09
1	т. 3	10	-64,07	–	
	т. 1	5	-178,75	$h_{т1-т2} =$ $= +335,79$	0,21
	т. 2	5	+156,83		

Из табл. 4 видно, что измерения с точки т. 3 практически безошибочны, в то время как с т. 1 ошибка при визировании на ближнюю цель (т. 2) равна плюс 1,1 мм, а на дальнюю – минус 1,2 мм. Не исключено, что легкий алюминиевый штатив (т. 2) мог изменить свое первоначальное положение, так как объяснить ошибки с разными знаками (+1,1 и –1,2 мм) непостоянством коэффициента рефракции для точек, расположенных на одной линии, не представляется возможным. Данные измерений с крайних точек профиля представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты взаимных неодновременных измерений (1.10.13)

№ точки	Количество приемов, n	$h_{зем}$, мм	$\Delta = h_{ист} - h_{зем}$, мм	Время измерений (местное)	$\Delta_h = h_{max} - h_{min}$, мм / "	$m_{внутр}$, мм / "
т. 3	25	-117,60	+0,16	16:20 – 16:48	2,5 / 2,5	0,6 / 0,6
т. 1	20	+116,26	+1,18	17:11 – 17:38	3,0 / 3,0	0,7 / 0,7

Значения коэффициентов рефракции, вычисленные по данным измерений 1 октября, представлены в табл. 6.

Таблица 6

Опытные значения коэффициентов рефракции (1.10.13)

	k	dT/dh , град/м	δz , "
С точки т. 3	-0,05	-0,046	0,2
С точки т. 1	-0,37	-0,098	1,2
По взаимным наблюдениям	-0,21		

Из табл. 6 видно, что в пасмурный, холодный день значения коэффициентов рефракции не так заметно отличаются от общепринятого значения +0,13, как в солнечную погоду, однако и в этом случае коэффициенты имеют знак минус.

И, наконец, определения коэффициента рефракции выполнялись 7 октября 2013 г. в пасмурную погоду при $t = +4^\circ$ и скорости ветра до 5 м/с. Для этого на местности, незначительно поросшей растительностью, были установлены два штатива с отражателями на расстоянии 232 м. Превышение между целями было измерено тахеометром десятью приемами, способом из середины и составило $h = 1\,929,16$ мм. Из наших предыдущих исследований [8–10] следует, что при благоприятных условиях многократно измеренное превышение способом из середины практически можно считать безошибочным, поэтому в дальнейшем значение 1 929,16 мм было принято за истинное. Результаты опыта представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты взаимных одновременных измерений (7.10.13)

№ точки	Количество приемов, n	$h_{зем}$, мм	$\Delta = h_{ист} - h_{зем}$, мм	$\Delta_h = h_{max} - h_{min}$, мм / "	$m_{внутр}$, мм / "	k , коэфф. реф.
1	20	-1 928,72	-0,44	5,6 / 5,0	1,5 / 1,3	+0,10
2	20	+1 929,38	-0,22	3,7 / 3,3	1,1 / 1,0	+0,05

Из табл. 7 следует, что отличия значений превышений из односторонних наблюдений от истинного значения находятся в пределах точности измерений, т. е. значения коэффициентов рефракции сопоставимы с ошибками их определения.

В статье [20] отмечается, что сумма прямого и обратного превышений может служить количественной характеристикой, описывающей реальное рефракционное поле в процессе нивелирования. Установлено, что для длин линий 650 м величины, описывающие поле рефракции, лежат в диапазоне от +40 до -110 мм. Значения величин, описывающих поле рефракции для наших опытов, представлены в табл. 8.

Таблица 8

Характеристики реального рефракционного поля

Дата опыта	Погода	$h_{прям} + h_{обр}$, мм
12.09.13	солнечно, $t = +18$ °С	-85,6
01.10.13	пасмурно, $t = 0$ °С	-1,3
07.10.13	пасмурно, $t = +4$ °С	+0,7

Из табл. 8 видно, что систематическая составляющая рефракционного влияния на результаты двухстороннего тригонометрического нивелирования в пасмурную погоду при температуре воздуха, близкой к нулю, незначительна.

Если допустить, что коэффициент рефракции одинаков при визировании на заднюю и переднюю цели, то рефракционную ошибку на станции в зависимости от неравенства плеч и величины коэффициента рефракции можно подсчитать, используя формулу:

$$r = \frac{0,785 D^2}{\sin^2 z} k, \quad (7)$$

где поправка за рефракцию r вводится со знаком минус, D – расстояние до цели в сотнях метров, z – зенитное расстояние, k – коэффициент рефракции. Для суммы плеч 200 м результаты вычислений представлены в табл. 9.

Таблица 9

Рефракционные ошибки на станции для суммы плеч 200 м

Неравенство плеч, м	Коэффициент рефракции k					
	0,13	0,5	1	2	3	4
2	0,00	0,02	0,03	0,06	0,09	0,13
5	0,01	0,04	0,08	0,16	0,24	0,32
10	0,02	0,08	0,16	0,32	0,47	0,63
15	0,03	0,12	0,24	0,47	0,71	0,95
30	0,06	0,24	0,47	0,95	1,42	1,90
60	0,12	0,47	0,95	1,14	2,85	3,80

Очевидно, чем больше коэффициент рефракции, тем более строгие требования предъявляются к установке тахеометра между измеряемыми точками. В работах [12, 13] даются рекомендации о времени, в которое следует выполнять измерения: в течение всего дня при устойчивом влиянии рефракции, за исключением одного-полтора часов после восхода и до захода солнца, а также исключая часы, когда изображение цели сильно колеблющееся и расплывчатое. Как следует из статьи [16], в пасмурную погоду в указанный промежуток времени коэффициенты рефракции, как правило, не превосходят значения минус 2, а в солнечную погоду – минус 4 (при прохождении визирного луча на высоте ~1,8 м над травяной поверхностью). Если принять за предельную рефракционную ошибку на станции величину 0,5 мм, то, в соответствии с табл. 4, при длинах плеч 100 м следует ограничить их неравенство на станции для нивелирования III класса: в пасмурную погоду – 20 м, в солнечную – 10 м. Для нивелирования IV класса эти допуски возможно принять 30 и 20 м соответственно. Установленные допуски рекомендуются для длин плеч до 300 м.

Однако, равенство коэффициентов рефракции при визировании на заднюю и переднюю цели весьма условно. Поэтому желательно выбирать место установки прибора таким образом, чтобы условия прохождения визирного луча «назад» и «вперед» были однородны. Для этого следует:

- избегать разной подстилающей поверхности при взгляде «назад» и «вперед», особенно вблизи прибора;
- исключатьхождение визирного луча ниже 1,0 м над подстилающей поверхностью и устанавливать цель не ниже 1,5 м над землей.

Указанные выше допуски на неравенство плеч целесообразно применять, когда необходимо точно определить превышение между смежными точками, например, при определении высот пунктов строительной сетки. На участке высотного хода между исходным репером и определяемой точкой из-за условий местности тахеометр может быть установлен с большим значением неравенства плеч. Тогда необходимо произвести компенсацию разницы на последующих станциях с аналогичными длинами плеч до определяемой точки и, по возмож-

ности, в течение часа, пока не произошло значительное изменение коэффициента рефракции [11, 16]. Очевидно, как и в геометрическом нивелировании, требуется ограничить накопление неравенства плеч по секции. Если принять за допустимое накопление неравенства плеч по секции величину удвоенного допуска на станции, то для III класса накопление не должно превышать 30 м, для IV класса – 50 м.

Опираясь на работы [8–11] и результаты проведенных исследований можно сделать несколько основных выводов.

1. Значение коэффициента рефракции в приземном трехметровом слое воздуха может значительно отличаться от общепринятого +0,13, и в течение большей части дня имеет знак «минус». Это налагает определенные ограничения на неравенство плеч на станции, которые не должны превышать следующих пределов: для нивелирования III (IV) класса: в пасмурную погоду – 20 (30) м, в солнечную – 10 (20) м.

2. Смещение прибора от середины в сторону цели, изображение которой больше размыто и колеблется, может привести к компенсации систематической составляющей рефракции. В конкретном случае (для суммы длин плеч 200 м) компенсация произошла при смещении прибора от середины на 15 м. При сильно искаженном изображении целесообразно отказаться от измерений или заметно уменьшить длину плеч.

3. Принимая следующие меры по снижению воздействия внешних условий на результаты тригонометрического нивелирования, можно добиться его соответствия по точности геометрическому нивелированию III и IV классов:

- выполнение измерений, исключая периоды, близкие к восходу и заходу солнца (в пределах 1,5 – 2 часов), и в периоды сильно колеблющихся изображений;

- высота визирного луча над подстилающей поверхностью должна быть не менее 1,0 м, а высота цели – не менее 1,5 м;

- сохранение неравенства плеч в указанных пределах.

Тригонометрическое нивелирование с применением электронных тахеометров в настоящее время успешно заменяет геометрическое нивелирование не только при проложении высотных ходов, но и при наблюдениях за осадками и деформациями зданий и сооружений и при выверке технологического оборудования [21–27].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. Федеральная служба геодезии и картографии России. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2004. – 244 с.

2. Руководство по топографической съемке в масштабах 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000 и 1 : 500. Высотные сети. – М.: Недра, 1976. – 208 с.

3. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000 и 1 : 500. – М.: Недра, 1982. – 160 с.

4. Редьков В. С. Руководство по техническому нивелированию и высотным теодолитным ходам. – М.: Недра, 1974. – 72 с.

5. Лышко М. В., Русак В. М., Чадович Д. В. Анализ точности ходов тригонометрического нивелирования при создании съемочного обоснования // Инженерные изыскания. – 2010. – № 3. – С. 60–63.
6. Rüeger J. M., Brunner F. K. Practical results of EDM-Height traversing // The Australian Surveyor. – 1981. – Vol. 30, No. 6. – 363–373.
7. Hibbert R. J. Practical EDM height traversing to geodetic levelling accuracies as used in a geophysical monitoring scheme // Survey Review. – 1992. – Vol. 31. – 434–453.
8. 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.
9. Никонов А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Бурмистров Г. А. К вопросу об оценке точности при ограниченном числе измерений // Труды МИИГАиК. – 1961. – Вып. 44. – С. 51–58.
15. Kharaghani G. A. Propagation of refraction errors in trigonometric height traversing and geodetic levelling. Technical report № 132. University of New Brunswick. Canada. 1987.
16. 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.
17. Иордан В., Эггерт О., Кнейсель М. Руководство по высшей геодезии. Прецизионное и тригонометрическое нивелирование. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 263 с.
18. Brocks K. Meteorologische Hilfsmittel für die geodätische Höhenmessung. Zeitschrift für Vermessungswesen, – 1950. – (3), 71 – 76; (4), 110 – 116, 145 – 152.
19. Hübner E. Einfluss der terrestrischen Refraktion auf den Laserstrahl in bodennahen Luftschichten. Vermessungstechnik. – 1977. – 25(10), 349 – 353.
20. Bahnert G. Refraktioneinflüsse auf trigonometrische Nivellements. «Vermessungstechnik», 1981, 29, №3, 79–82 (нем.) (реф 7.52.188 1981).
21. Кошелев В. А., Карлин К. С., Чахлова А. П. Особенности развития геодезической разбивочной основы в условиях горной местности // 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. 87–92.
22. Никонов А. В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдений за осадками сооружений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинфор-

матика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 78–86.

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

24. Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Фролов И. С. Геодезический мониторинг и выверка металлургического оборудования // 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. 132–143.

25. Колмогоров В. Г. К вопросу о возможности изучения деформационного состояния земной поверхности по результатам повторного высокоточного нивелирования // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 9–14.

26. Рябова Н. М., Чешева И. Н., Лифашина Г. В. Исследование величины изменения угла i цифрового в зависимости от изменения температуры // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 19–24.

27. Кошелев А. В., Карпик А. П., Середович В. А. Фемтосекундный лазерный дальномер с распространением излучения в вакуумированной трубе // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 3–8.

Получено 20.01.2014

© А. В. Никонов, 2014