

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 528.021.4/.6:69

DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-6-14

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ И УЧЕТЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕФРАКЦИИ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ

Михаил Ярославович Брынь

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии, тел. (921)348-80-35, e-mail: bryn@mail.ru

Юлия Васильевна Лобанова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, старший преподаватель кафедры инженерной геодезии, тел. (981)685-30-06, e-mail: lobanowa@mail.ru

Дмитрий Андреевич Афонин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии, тел. (911)028-88-97, e-mail: afonin83@yandex.ru

В современных тахеометрах учет рефракции производится через введение коэффициента рефракции в память прибора. В статье выводятся формулы определения коэффициента рефракции по результатам геодезических измерений зенитных расстояний, горизонтальных проложений, превышений и приведены результаты натурных исследований. Предложена методика создания вертикального базиса, под которым понимается геодезическое построение, состоящее из закрепленных на вертикальной поверхности точек на одной отвесной линии и точек на местности, превышения между которыми определены с высокой точностью. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению суточного хода коэффициента рефракции, который показал, что утром и ночью значения коэффициентов рефракции имеют значения положительные, а днем и вечером – отрицательные. Рекомендовано на строительной площадке для повышения точности результатов определять коэффициент рефракции каждые полчаса. Изменение коэффициента в течение получаса не должно превышать 0,2. Если коэффициент рефракции будет превышать это значение, то в результаты измерений необходимо будет вводить поправки за рефракцию.

Ключевые слова: вертикальная рефракция, коэффициент рефракции, тригонометрическое нивелирование, электронный тахеометр

Введение

При внедрении электронных тахеометров в геодезическое производство они стали основными приборами для геодезического сопровождения строительства [1–7]. Эти приборы используются, в том числе и для опре-

деления превышений тригонометрическим нивелированием при мониторинге деформаций возводимых зданий и строительных конструкций [8–17]. Так, ГОСТ 24846–2012 [18] рекомендует использовать тригонометрическое нивелирование при определении вертикальных перемещений при II–IV классах

точности измерений. При II, III и IV классах точности допустимые ошибки измерения вертикальных перемещений составляют соответственно 2, 5, 10 мм. При этом измерение вертикальных перемещений методом тригонометрического нивелирования рекомендуется проводить короткими визирными лучами (до 100 м). Однако, как показывает практика, при проведении работ на строительной площадке расстояния от тахеометра до визирных целей часто превышают 100 м, используется при этом, как правило, одностороннее тригонометрическое нивелирование. В качестве визирных целей в большинстве случаев используются отражательные пленки (ОП) или отражатели с креплением к поверхности. Однако исследований по учету вертикальной рефракции – основного фактора, ограничивающего точность тригонометрического нивелирования, на короткие расстояния для условий реального производства крайне мало. Как правило, эта задача решается путем введения в память электронного тахеометра коэффициента рефракции, который может изменяться от – 6 до + 6 [19]. Поэтому задача обобщения способов определения коэффициента рефракции геодезическими методами и его учета для расстояний от электронного тахеометра до визирных целей до 200 м является задачей актуальной.

Способы определения коэффициента рефракции

При одностороннем тригонометрическом нивелировании превышение h между пунктами вычисляется по формуле [20]

$$h = d \operatorname{ctg} z + i - l + f, \quad (1)$$

где d – горизонтальное проложение между пунктами; z – зенитное расстояние; i – высота прибора; l – высота визирной цели; f – поправка за совместное влияние кривизны Земли и рефракцию.

Поправка f выражается формулой [21]

$$f = \frac{1-k}{2R} d^2. \quad (2)$$

Здесь R – радиус Земли; k – коэффициент рефракции, который находится по формуле [19]

$$k = \frac{R}{R_c},$$

где R_c – радиус световой кривой.

Совместная поправка f состоит из двух поправок: поправки за кривизну Земли

$$K = \frac{d^2}{2R} \text{ и поправки за рефракцию}$$

$$r = \frac{kd^2}{2R}. \quad (3)$$

Средняя квадратическая ошибка (СКО) m_h превышения, определенного тригонометрическим нивелированием, вычисляется по формуле

$$m_h^2 = \operatorname{ctg}^2 z \cdot m_d^2 + \frac{d^2}{\sin^2 z} \cdot \frac{m_z^2}{\rho^2} + m_i^2 + m_l^2 + m_f^2, \quad (4)$$

где m_d, m_z, m_i, m_l, m_f – СКО определения соответственно горизонтального проложения, зенитного расстояния, высоты прибора, визирной цели и суммарной поправки за кривизну Земли и рефракцию.

Для того чтобы оценить точность определения превышения без учета ошибок за кривизну Земли и рефракцию, в формуле (4) примем $m_i = 1$ мм, $m_l = 0$ (так как визирование проводится на ОП), а m_f пока не будем учитывать.

Исходя из вышесказанного, СКО превышения будет вычисляться по формуле

$$m_h^2 = \operatorname{ctg}^2 z \cdot m_d^2 + \frac{d^2}{\sin^2 z} \cdot \frac{m_z^2}{\rho^2} + m_i^2.$$

Ниже (табл. 1) приводится предрасчет точности одностороннего тригонометрического нивелирования при условии $m_z = 1''$, $m_d = 2$ мм.

Таблица 1

Результаты предрасчета точности

$d \backslash z$	85°	80°	70°	60°	50°	40°	30°
40	1,03	1,08	1,15	1,54	1,97	2,60	3,63
50	1,04	1,09	1,16	1,55	1,98	2,61	3,64
60	1,06	1,10	1,28	1,56	1,99	2,62	3,65
70	1,07	1,11	1,29	1,58	2,00	2,64	3,67
80	1,09	1,13	1,30	1,59	2,02	2,65	3,69
90	1,11	1,15	1,32	1,61	2,03	2,67	3,71
100	1,13	1,17	1,34	1,63	2,05	2,69	3,73
150	1,25	1,29	1,46	1,74	2,17	2,82	3,89
180	1,34	1,38	1,55	1,83	2,26	2,92	4,01
190	1,37	1,41	1,58	1,86	2,29	2,96	4,05
200	1,41	1,45	1,61	1,89	2,33	2,99	4,09

Из табл. 1 видно, что при уменьшении зенитных расстояний с 85 до 30° СКО определения превышения увеличивается примерно в 3 раза, а при увеличении расстояний с 40 до 200 м m_h увеличивается максимально в 1,4 раза. Поэтому следует рекомендовать использование тригонометрического нивелирования при зенитных расстояниях более 60° градусов, а влияние рефракции, чтобы оно было пренебрегаемо мало, должно быть в три раза меньше, т. е. на уровне 0,7 мм.

Вычислим, каким изменением коэффициента рефракции можно пренебречь. Из формулы (3) выразим $k = \frac{2Rr}{d^2}$. При полученном ранее пренебрегаемо малом влиянии рефракции $r = 0,7$ мм и $d = 200$ м получим $k = 0,2$.

Перейдем теперь к обобщению способов определения коэффициента рефракции. По результатам одностороннего тригонометрического нивелирования из формулы (1) легко получить формулу

$$k = 1 - \frac{2R}{d^2}(h - d \operatorname{ctg} z - i + l). \quad (5)$$

Допустим, что измерения электронным тахеометром выполняются на ОП, поэтому примем $l = 0$. Подставив в формулу (5) вместо h значение превышения $h_{\text{теор}}$ на вертикальном базисе, получим:

$$k = 1 - \frac{2R}{d} \left(\frac{h_{\text{теор}}}{d} - \operatorname{ctg} z - \frac{i}{d} \right). \quad (6)$$

Отметим, что под вертикальным базисом будем понимать геодезическое построение, состоящее из закрепленных на вертикальной поверхности точек на одной отвесной линии и точек на местности, превышения между которыми определены с высокой точностью.

Для определения коэффициента рефракции могут использоваться также измеренные зенитные расстояния и их теоретические значения $z_{\text{теор}}$ [22]. При $l = 0$ из формулы (1)

$$\operatorname{ctg} z_{\text{теор}} = \frac{h_{\text{теор}} - i}{d} - \frac{d}{2R}.$$

Для вычисления коэффициента рефракции найдем $\Delta z = z_{\text{изм}} - z_{\text{теор}}$. Считая, что влияние рефракции можно, с одной стороны, вычислить по формуле [19] $r = \frac{d \Delta z}{\rho''}$, а с другой стороны, по формуле (3), получим $\frac{d \Delta z}{\rho''} = \frac{kd^2}{2R}$. И окончательно будем иметь

$$k = \frac{2R \Delta z}{d \rho''}. \quad (7)$$

Третий способ определения коэффициента рефракции получим, приняв значение превышения из геометрического нивелирования ($h_{\text{теор}}$) за безошибочное значение и связав его с превышением из тригонометрического нивелирования ($h_{\text{триг.н.}}$) без учета поправки за кривизну Земли:

$$h_{\text{теор}} = h_{\text{триг.н.}} - \frac{kd^2}{2R}.$$

Окончательно:

$$k = \frac{2R(h_{\text{триг.н.}} - h_{\text{теор}})}{d^2} = \frac{2R\Delta h}{d^2}, \quad (8)$$

где $\Delta h = h_{\text{триг.н.}} - h_{\text{теор}}$.

Методика построения вертикального базиса

Очевидно, что при построении вертикального базиса необходимо принимать меры для определения превышения с как можно меньшей СКО. Для реальных условий строительной площадки эту ошибку можно принять равной 0,5–0,7 мм. Предлагается для создания базиса использовать идею определения превышений «во всех комбинациях».

Пример вертикального базиса приведен на рис. 1.

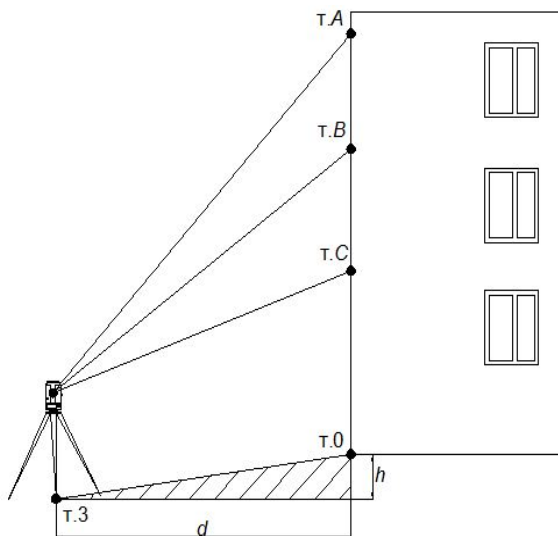


Рис. 1. Схема вертикального базиса

Для создания базиса на стене здания на одной отвесной линии в точках A, B, C были закреплены три отражающие пленки ОП, а на поверхности земли закреплена т. O (см. рис. 1), и разными способами измерены расстояния $d_1 - d_7$ (рис. 2), а превышение h определено геометрическим нивелированием.

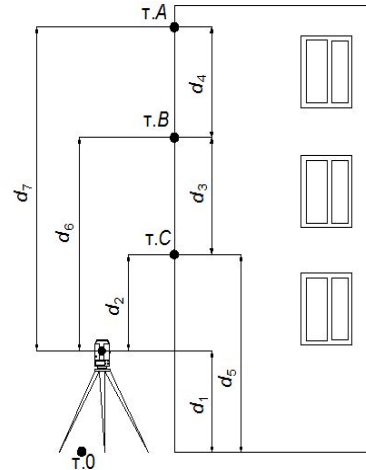


Рис. 2. Схема измерения вертикальных расстояний

Высота прибора d_1 измерена 3 раза способом передачи отметки с помощью нивелира с СКО 0,1 мм (здесь и далее СКО вычислены по формуле Бесселя); d_2 – расстояние от визирной оси прибора до т. C (измерено 9 раз электронным тахеометром с насадкой вертикального проектирования с СКО 0,5 мм); d_3 – расстояние от т. C до т. B ; d_4 – расстояние от т. B до т. A (расстояния d_3, d_4 измерены по 5 раз каждое компарированной рулеткой с СКО 0,3 мм); d_5 – расстояние от т. O до т. C измерено 4 раза компарированной рулеткой с СКО 0,6 мм; а расстояния d_6, d_7 от визирной оси прибора до точек B, A измерены по 9 раз электронным тахеометром с насадкой вертикального проектирования с СКО 0,5 и 0,3 мм соответственно.

Превышения между точкой т. O и точками A, B, C получены после уравнивания коррелятным способом [23]. Для этого были составлены три условных уравнения связи

$$d_1 + d_2 - d_5 = 0;$$

$$\begin{aligned} d'_2 + d'_3 - d'_6 &= 0; \\ d'_2 + d'_3 + d'_4 - d'_7 &= 0, \end{aligned}$$

где d'_i – уравненные значения измеренных величин.

Запишем условные уравнения поправок в матричном виде $AV + W = 0$, где A – матрица коэффициентов условных уравнений поправок,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$$V^T = [0,04 \quad -0,10 \quad -0,03 \quad -1,39 \quad -1,05 \quad -0,23 \quad 0,48] \text{ мм.}$$

Для оценки точности полученных результатов [24] вычислена по формуле $\mu = \sqrt{\frac{V^T Q^{-1} V}{r}}$ СКО единицы веса (она оказалась равной 1,95 мм), а также обратная весовая матрица уравненных значений измеренных величин $Q_{d'} = Q_A \cdot Q$, где $Q_A = E - QA^T(AQA^T)^{-1}A$. СКО расстояний $d'_1 - d'_7$ составили 0,29; 0,76; 0,24; 0,92; 0,79; 0,76; 0,75 мм соответственно.

Для того, чтобы определить ошибки превышений точек C, B, A над точкой 0 , составим вектор-функцию [25]

$$\varphi = \begin{bmatrix} h_C \\ h_B \\ h_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d'_5 \\ d'_1 + d'_6 \\ d'_1 + d'_7 \end{bmatrix}$$

и найдем обратную весовую матрицу вектор-функции по формуле $Q_\varphi = FQ_{d'}F^T$, где F – матрица частных производных. В результате получим

$$Q_\varphi = \begin{bmatrix} 0,10 & 0,10 & 0,03 \\ 0,10 & 0,10 & 0,03 \\ 0,03 & 0,03 & 0,10 \end{bmatrix}.$$

Тогда СКО уравненного превышения т. C над т. 0 будет $m_{h_C} = \mu \cdot \sqrt{Q_c} = 1,95 \sqrt{0,10} =$

V – вектор поправок к результатам измерений; W – вектор невязок,

$$W^T = [-1,0 \quad -0,1 \quad 2,0] \text{ мм.}$$

После реализации формул коррелятного способа $NK + W = 0$, где $N = AQA^T$ – матрица коэффициентов нормальных уравнений; Q – диагональная матрица обратных весов измерений; K – вектор коррелят, который находится по формуле $K = -N^{-1}W$; $V = QA^T K$. Получен вектор поправок к результатам измерений

$= 0,62$ мм. Аналогично СКО превышений т. B и т. A будут равны 0,62 и 0,63 мм соответственно.

Превышение между т.3 и т.0 (см. рис. 1) определялось геометрическим нивелированием цифровым нивелиром Trimble DiNi 0.3 с СКО измерения превышений 0,3 мм/км двойного хода. Так как длина хода составила 161 м, то СКО этого превышения будет выражаться формулой $m_h = 0,3\sqrt{0,161}$ и составит 0,12 мм. И тогда СКО превышения т. C над т. 3 может быть вычислена по формуле $m_C = \sqrt{m_{h_C}^2 + m_h^2} = \sqrt{0,62^2 + 0,12^2} = 0,63$ мм. Аналогично определяются СКО превышения точек B и A : $m_B = 0,63$ мм, $m_A = 0,64$ мм.

Таким образом, превышения вертикального базиса определены с СКО на уровне 0,6 мм.

Определение коэффициента рефракции на вертикальном базисе

Для определения суточного хода рефракции на вертикальном базисе были проведены полевые экспериментальные исследования 26 и 27 июня 2019 г. Для исследования рефракции на удалении 161 м от вертикального базиса была закреплена т. 3.

Измерение зенитных расстояний и наклонных расстояний выполнялось электронным тахеометром Leica Viva TS 16 M R500

с СКО измерения углов 1" и расстояний $(2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D)$, где D – измеренное расстояние в мм.

Измерения выполнялись с 8:20 ч. 26 июня до 4:40 ч. 27 июня 2019 г. (всего выполнено 19 циклов измерений) при перепаде температуры в 3° (от +16 до +19 °С). Давление оставалось постоянным (764 мм рт. ст.), а сила ветра постоянно менялась. В табл. 2 выборочно представлены значения $\Delta z = z_{\text{измер}} - z_{\text{теор}}$ и $\Delta h = h_{\text{триг.н}} - h_{\text{теор}}$, а значения коэффициентов рефракции получены по различным формулам.

На графике (рис. 3) представлены значения коэффициентов рефракции, полученные по формуле (6), при выполнении измерений на т. С.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

– значения коэффициентов рефракции, вычисленные по предложенным формулам (6)–(8), практически совпадают и значит, все формулы корректны и могут применяться как независимые, так и взаимозаменяемые;

– утром и ночью значения коэффициентов рефракции имеют значения положительные, а днем и вечером – отрицательные.

Таблица 2

Изменения коэффициентов рефракции

Время измерений	$\Delta z''$	Δh , мм	Коэффициенты рефракции, вычисленные по формулам		
			(6)	(7)	(8)
8:20	+1,9	-0,5	+0,39	+0,38	+0,38
9:30	+2,5	+0,7	+0,98	+1,00	+1,00
12:30	+1	-0,5	+0,41	+0,38	+0,41
15:05	0	-1,3	0	0	0
17:00	+1	-0,4	+0,43	+0,39	+0,43
18:50	-0,5	-1,4	-0,17	-0,19	-0,17
19:30	+0,5	+0,9	+0,20	+0,19	+0,20
21:05	-1	-0,8	-0,37	-0,38	-0,38
22:35	-1,6	-0,6	-0,62	-0,63	-0,64
01:50	+0,5	+0,4	+0,21	+0,19	+0,20
02:30	-0,5	-0,4	-0,18	-0,19	-0,18
04:40	0	0	+0,01	0	0



Рис. 3. Изменение k при визировании на т. С

Заключение

1. Предложена методика создания вертикального базиса, в основу которого положена идея выполнения измерений «во всех комбинациях».

2. Обобщены формулы определения коэффициентов рефракции по результатам измерений на вертикальном базисе, по измеренным и известным зенитным расстояниям, по разностям измеренных тригонометрическим нивелированием и известным из геометрического нивелирования превышений. Корректность формул подтверждена натурными исследованиями.

3. Проведен эксперимент по определению коэффициента рефракции в течение суток, он показал, что значения коэффициентов рефракции в период проведения эксперимента менялись в пределах от $-0,98$ до $+1,31$.

4. Предлагается на строительной площадке на расстояниях от тахеометра до визирных целей до 200 м для повышения точности результатов определять k каждые полчаса. Изменение Δk в течение получаса не должно превышать 0,2, тогда изменение значений k не будет влиять на результаты нивелирования. Если k будет превышать это значение, то в результаты измерений необходимо будет вводить поправки за рефракцию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вшивкова О. В. О комплексном подходе к решению рефракционной проблемы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 3. – С. 3–9.
2. Дементьев В. Е. Исследование вертикальной рефракции на горизонтальных трассах в аридной зоне // Геодезия и картография. – 2014. – № 2. – С. 57–64.
3. Зверев Л. А., Мошенжал А. В. О роли метода георадиолокации при полевом обследовании стройплощадок в инженерных изысканиях // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 1 (25). – С. 54–59.
4. Nestorovic Z., Delcev S. Comparison of height differences obtained by trigonometric and spirit leveling method // Geonauka. – 2014. – Vol. 2, No. 4. – P. 30–37.
5. Никонов А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35.
6. 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.
7. Сальников В. Г. Современная методика выноса главных осей турбоагрегатов // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 1 (25). – С. 27–33.
8. Изотов А. А., Пеллинен Л. П. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования // Тр. ЦНИГАиК. – 1955. – № 102. – 175 с.
9. Zou J., Zhu Y., Xu Y., Li Q., Meng L., Li H. Mobile precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise leveling // Survey Review. – 2017. – Vol. 49, Issue 355. – P. 249–258.
10. Мозжухин О. А. К анализу путей развития проблемы учета рефракции в нивелировании // Геодезия и картография. – 1994. – № 11. – С. 16–19.
11. Mustafin M. G., Valkov V. A., Kazantsev A. I. Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises // Procedia engineering. – 2017. – P. 729–736.
12. Уставич Г. А., Рахымбердина М. Е., Никонов А. В., Бабасов С. А. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22.
13. Сальников В. Г. Совершенствование методики геодезических измерений для обеспечения строительства и эксплуатации энергетических объектов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2015. – 24 с.
14. Уставич Г. А., Китаев Г. Г., Никонов А. В., Сальников В. Г. Создание геодезической основы для строительства объектов энергетики // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 48–54.
15. Шульц Р. В., Анненков А. А., Хайлак А. М., Стрилец В. С. Статистическое исследование перемещений подпорных стенок по результатам геодезических измерений // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 35–53.
16. Хорошилов В. С. Оптимизация выбора методов и средств геодезического монтажа технологического оборудования // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 117–124.
17. Shults R., Roshchyn-Kyiv O. Preliminary determination of spatial geodetic monitoring accuracy for free station method // Geodetski List. – 2016. – Vol. 70, No. 4. – С. 355–370.

18. ГОСТ 24846–2012. Грунты. Методы измерения деформации оснований зданий и сооружений. – М. : Стандартиформ, 2014.
19. Островский А. Л. Достижения и задачи рефрактометрии // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 6–15.
20. Карлсон А. А. О классификации точного нивелирования короткими лучами // Геодезия и картография. – 1993. – № 6. – С. 11–13.
21. 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 Львовского политех. ин-та. Сер. Геодезическая. – 1962. – Вып. 82, № 7. – С. 3–30.
22. Подшивалов В. П., Али Салим. Тригонометрическое нивелирование коротким лучом // Геодезия и картография. – 1994. – № 6. – С. 18–19.
23. Падве В. А., Мазуров Б. Т. Метод наименьших квадратов (статика, динамика, модели с уточняемой структурой) // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 22–35.
24. Машимов М. М. Методы математической обработки астрономо-геодезических измерений. – М. : ВИА, 1990. – 510 с.
25. Коугия В. А. Избранные труды. – СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2012. – 448 с.

Получено 25.01.2021

© М. Я. Брынь, Ю. В. Лобанова, Д. А. Афонин, 2022

DETERMINING AND CONSIDERING A REFRACTIVE INDEX ON CONSTRUCTION SITE

Mikhail Y. Bryn

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moscow Prospect St., Saint Petersburg, Russia, 190031, D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy, phone: (921)348-80-35, e-mail: bryn@mail.ru

Yulia V. Lobanova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moscow Prospect St., Saint Petersburg, Russia, 190031, Senior Lecturer, phone: (981)685-30-06, e-mail: lobanova_@mail.ru

Dmitry A. Afonin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moscow Prospect St., Saint Petersburg, Russia, 190031, Ph. D., Associate Professor, phone: (911)028-88-97, e-mail: afonin83@yandex.ru

Taking into account the refraction in modern total station is performed by inputting the refraction coefficient into the memory of the device. The article develops a formula to determine the refraction coefficient based on geodetic surveys (zenith distances, horizontal positions, elevations) and provides field survey results. The article proposes the method for creation of the vertical basis (a geodetic structure consisting of the points fixed on a vertical plane on one vertical line and ground points with highly accurate differences in elevations determined between them). The article provides experimental survey results in determining the diurnal variation of the refraction coefficient which showed that in the morning and at night the refraction coefficient values are positive, and in the day and in the evening they are negative. There is a recommendation for the construction site to determine the refraction coefficient every half hour to increase the accuracy of the results. The variation of the coefficient within half hour shall not exceed 0.2. If the refraction coefficient exceeds this value, then refraction corrections shall be introduced in the measurement results.

Keywords: vertical refraction, refractive index, trigonometric levelling, electronic total station

REFERENCES

1. Vshivkova, O. V. (2010). Integrated Approach to Solving the Refraction Problem. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 3, 3–9 [in Russian].
2. Dementiev, V. E. (2014). Studying Vertical Refraction on Horizontal Routes in the Arid Zone. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 2, 57–64 [in Russian].

3. Zverev, L. A., & Moshenzhal, A. V. (2014). On the role of goradiolocation method in the field survey of construction sites during engineering survey. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 1(25), 54–59 [in Russian].
4. Nestorovic, Z., & Delcev, S. (2014). Comparison of height differences obtained by trigonometric and spirit leveling method. *Geonauka*, 2(4), 30–37.
5. Nikonov, A. V. (2013). Examination of accuracy of trigonometric leveling using the method from the middle using the electronic total station. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 2(22), 26–35 [in Russian].
6. Nikonov, A. V. (2013). Application Features of Modern Geodesic Survey Instruments in the Observation of Settlements and Deformations of Buildings and Structures of Power Engineering Facilities. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 4(24), 12–18 [in Russian].
7. Salnikov, V. G. (2014). Contemporary method for setting out of axes of turbine generator sets. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 1(25), 27–33 [in Russian].
8. Izotov, A. A., & Pellinen, L. P. (1955). Studying the Earth's Refraction and Geodetic Leveling Methods. *Trudy TsNIGAiK [Proceedings of Central Research Institute of Geodetic Surveying, Airborne Surveying and Mapping]*, 102, 175 p. [in Russian].
9. Zou, J., Zhu, Y., Xu, Y., Li, Q., Meng, L., & Li, H. (2017). Mobile precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise leveling. *Survey Review*, 49(355), 249–258.
10. Mozzhukhin, O. A. (1994). Analysis of the Development Trends of the Problem Refraction Accounting in Leveling. *Surveying and Mapping*, 11, 16–19.
11. Mustafin, M. G., Valkov, V. A., & Kazantsev, A. I. (2017). Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises. *Procedia Engineering*, pp. 729–736.
12. Ustavich, G. A., Rakhymberdina, M. E., Nikonov, A. V., & Babasov, S. A. (2013). Development and improvement of engineering geodetic leveling technology by trigonometric method. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 17–22 [in Russian].
13. Salnikov, V. G. (2015). Improvement of geodetic measurement methods for construction support and operation of power facilities. *Extended abstract of candidate's thesis*. Novosibirsk, 24 p. [in Russian].
14. Ustavich, G. A., Kitayev, G. G., Nikonov, A. V., & Salnikov V. G. (2013). Creating geodetic base for power industry construction projects. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 4, 48–54 [in Russian].
15. Shultz, R. V., Annenkov, A. A., Hailak, A. M., & Strilets V. S. (2014). Statistical survey of retaining wall movements by the results of geodetic measurements. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 3(27), 35–53 [in Russian].
16. Khoroshilov, V. S. (2006). Optimized selection of methods and means of geodetic installation of process equipment. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 11, 117–124 [in Russian].
17. Shults, R., & Roshchyn-Kyiv, O. (2016). Preliminary determination of spatial geodetic monitoring accuracy for free station method. *Geodetski List*, 70(4), 355–370.
18. Soils. Methods of measuring the strains of structure and building bases. GOST 24846-2012. Moscow: Standartinform Publ., 2014.
19. Ostrovsky, A. L. (2008). Refractometry achievements and objectives. *Geoprofi*, 1, 6–15 [in Russian].
20. Carlson, A. A. (1993). Classification of Accurate Short-Beam Leveling. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 11–13 [in Russian].
21. Drok, M. K. (1962). Issue of the Relative Height Correction for the Combined Effect of the Earth's Curvature and Vertical Refraction in Short-Distance Geodesic Leveling. *Nauchnye zapiski L'vovskogo politekhnicheskogo instituta. Seriya Geodezicheskaya [Proceedings of the Lviv Polytechnic National University. Surveying Series]*, 82(7), 3–30 [in Russian].
22. Podshivalov, V. P., & Ali Salim (1994). Trigonometric levelling by short beam. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 18–19 [in Russian].
23. Padve, V. A., Mazurov, B. T. (2017). Least-square method (statics, dynamics, models with adjusted structure). *Vestnik SGGGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 22–35 [in Russian].
24. Mashimov, M. M. (1990). *Metody matematicheskoy obrabotki astronomo-geodezicheskikh izmereniy [Methods of mathematical treatment of astronomic measurements]*. Moscow: VIA Publ. p. 510 [in Russian].
25. Kougia, V. A. (2012). *Izbrannye trudy [Selected writings]*. St. Petersburg: St. Petersburg State Transport University Publ., p. 448 [in Russian].

Received 25.01.2021

© M. Y. Bryn, Y. V. Lobanova, D. A. Afonin, 2022