

## Особенности выполнения высокоточного нивелирования при наличии направленных конвекционных потоков воздуха

*А. В. Никонов<sup>1\*</sup>, В. А. Скрипников<sup>1</sup>, М. А. Скрипникова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: sibte@bk.ru

**Аннотация.** При выполнении высокоточного нивелирования в условиях действующего промышленного предприятия нередки случаи, когда визирный луч проходит через направленные потоки горячего воздуха. Проведены лабораторные исследования, в которых использовались цифровой нивелир DiNi 0.3, оптический нивелир Н-05 и электронный тахеометр Leica TCRP 1201+. При прохождении визирного луча через поток горячего воздуха зафиксировано размытие изображения рейки, увеличение средней квадратической ошибки взятия отсчета по рейке в 2–3 раза. Поток нагретого воздуха приводит к появлению систематической ошибки взятия отсчета по рейке: при работе с цифровым нивелиром отсчеты меньше истинного значения, а при работе с оптическим нивелиром и тахеометром – больше. Ожидается, что среднее из значений превышения, полученных разными типами нивелиров, будет в большей степени свободно от систематического влияния рефракции.

**Ключевые слова:** электронный тахеометр, цифровой нивелир, рефракция, систематическая ошибка, точность, высокоточное нивелирование

## Features of the high-precision leveling in the conditions of directed convection streams of air

*A. V. Nikonov<sup>1\*</sup>, V. A. Skripnikov<sup>1</sup>, M. A. Skripnikova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: sibte@bk.ru

**Abstract.** When performing high-precision leveling in an operating industrial enterprise the sighting beam often to pass through directed streams of hot air. Laboratory researches were carried out using a DiNi 0.3 digital level, an H-05 optical level, and a Leica TCRP 1201+ total station. During the intersection of the sighting beam and hot air stream, observed of the blurring staff image, an increase in the standard deviation of taking a reading along the staff by 2–3 times. The stream of heated air leads to the appearance of a systematic error in taking readings along the staff: when working with a digital level, the readings are less than the true value, and when working with an optical level and total station – more. It is expected that the average of the elevation values obtained by different types of levels will be more free from the systematic influence of refraction.

**Keywords:** total station, digital level, refraction, systematic error, accuracy, high-precision levelling

### *Введение*

Известно, что неоднородность земной атмосферы обуславливает отклонение светового луча от его первоначального направления. Угол в вертикальной плоскости, образованный касательной к кривой светового луча, в точке наблюдения и прямой, проходящей через эту точку и точку наведения, называют углом

рефракции. Линейная величина на рейке, соответствующая такому углу, характеризует степень влияния нивелирной рефракции [1]. Наибольший вклад на величину рефракции оказывает вертикальный температурный градиент, направление которого совпадает с направлением возрастания температуры. Градиент температуры, направленный вверх, считается положительным (температура воздуха увеличивается с высотой), а вниз отрицательным [2].

В дневное время земная поверхность нагревается солнечной радиацией, и легкие потоки перегретого на  $1...2$  °С выше окружающей среды воздуха устремляются вверх, что формирует стратификацию в приземной части атмосферы с отрицательными градиентами температуры. Визирный луч, проходящий сквозь такие слои и направленный выпуклостью к земле, колеблется, вызывая тем самым колебание изображения цели в зрительной трубе. Установлено, что при наведении биссектора на середину колеблющегося изображения штриха инварной рейки отсчет будет содержать ошибку систематического характера [1]. В случае нивелирования на наклонном участке местности отсчеты по задней и передней рейкам будут искажаться вертикальной рефракцией неодинаково, что приведет к накоплению ошибок в ходе.

Исследованию влияния вертикальной рефракции на результаты геодезических измерений, проводимых в приземном слое атмосферы, посвящено множество работ [1–10]. В то же время высокоточное геометрическое нивелирование, производимое внутри промышленных помещений, имеет ряд особенностей. При наблюдениях за осадками фундаментов промышленных предприятий нивелирование выполняется коротким визирным лучом (до 25 м), в качестве подстилающей поверхности часто выступает не нагретый солнцем грунт, а бетонные полы производственных корпусов. В условиях действующего предприятия возникают случаи, когда визирный луч проходит через локальные тепловые поля, возникающие над нагретыми трубопроводами или оборудованием. Характерной ситуацией является передача отметки с улицы внутрь промышленного корпуса через ворота: в этом случае визирный луч пересекает тепловую завесу, т.е. проходит через направленные потоки теплого воздуха. Очевидно, что при прохождении визирного луча даже через небольшие участки с аномальными температурными градиентами в отсчете по рейке может возникнуть систематическая ошибка, причем не ясно, какой нивелир (цифровой или оптический) предпочтительнее использовать в подобных условиях.

### *Методы и материалы*

С целью исследования влияния направленных тепловых потоков на отсчет по нивелирной рейке были проведены лабораторные эксперименты в два этапа. В первый день на штативах рядом друг с другом были установлены два высокоточных прибора: цифровой нивелир Trimble DiNi 0.3 и оптический нивелир Н-05 (рис. 1, а). Высота приборов была принята одинаковой.

На расстоянии 15,5 м от нивелиров были стационарно установлены две инварные рейки (одна штриховая, вторая – штрих-кодовая). На удалении около 3 м от нивелиров был установлен конвектор со встроенным вентилятором, который

создавал локальный направленный тепловой поток воздуха на пути прохождения визирного луча (рис. 2).



Рис. 1. Схема установки нивелиров (а) и тахеометра (б) в ходе исследований

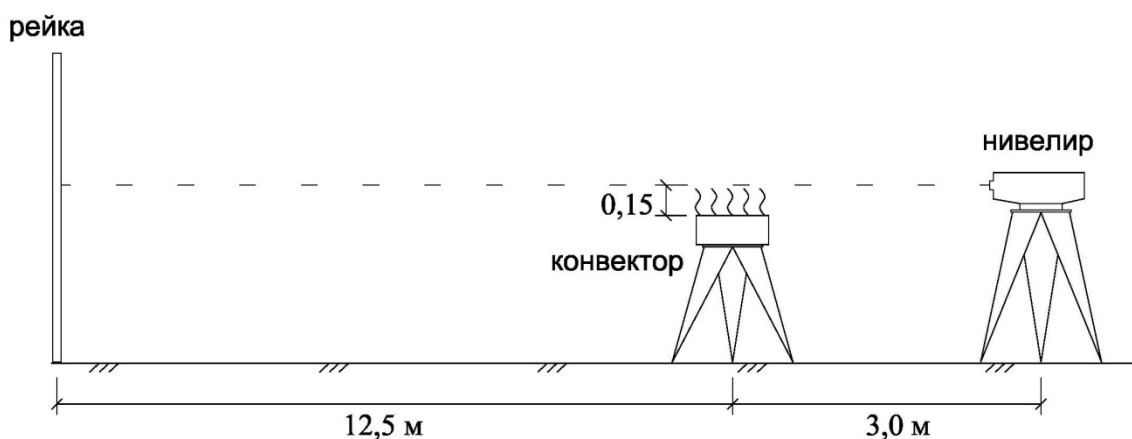


Рис. 2. Схема размещения нивелира и конвектора

Отсчеты по рейкам брались при выключенном конвекторе, а также при холодном и горячем ( $t \approx 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) потоке воздуха. Для каждого случая выполнялась серия измерений из 18 отсчетов. Измерения по аналогичной программе повторялись при установке нивелиров на расстоянии 6,5 м от реек.

Во второй день исследовали работу оптического нивелира Н-05 и высокоточного электронного тахеометра Leica TCRP 1201+ ( $m_\alpha=1''$ ) (рис. 1, б). Приборы устанавливались на расстоянии 14 м от инварной рейки, конвектор на расстоянии 3 м от них. При работе с тахеометром наведение выполнялось на штрих рейки при почти горизонтальном положении визирного луча (отсчет по вертикальному кругу  $0^\circ 0'$ ). Наведение производилось с помощью биссектора сетки нитей (рис. 2).

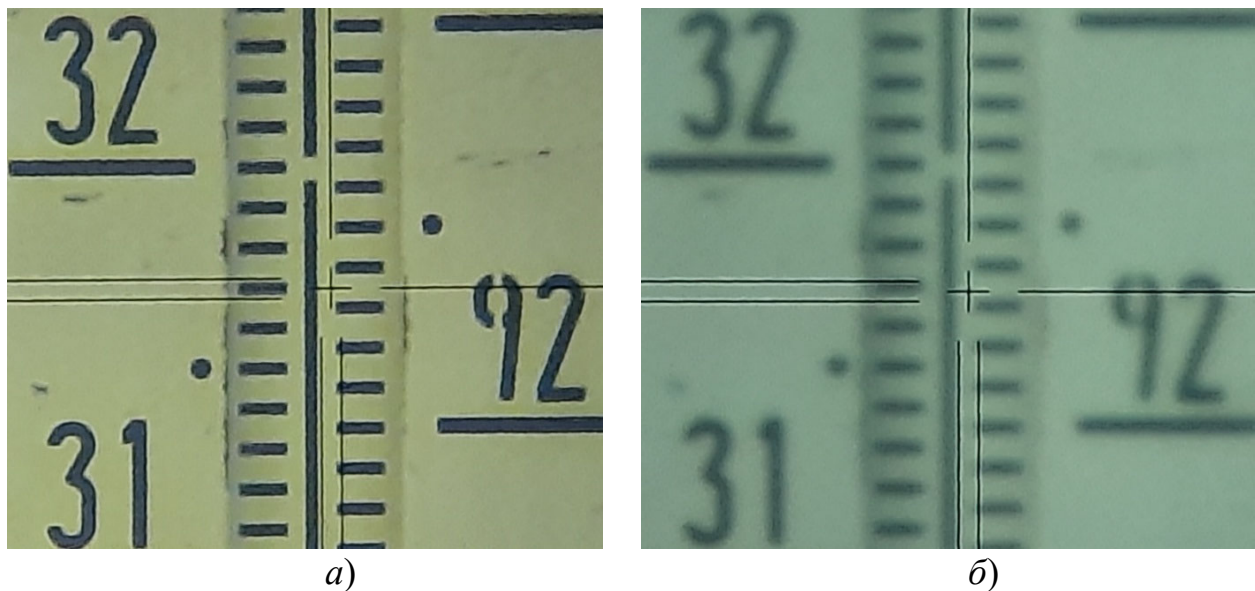


Рис. 2. Выполнение визирования на штрих рейки:  
 а) при отсутствии потоков воздуха; б) при потоках горячего воздуха

### Результаты

Для каждой серии измерений вычислялось среднее значение из отсчетов по рейке  $h_{\text{ср}}$  и средние квадратические ошибки одного измерения  $m_h$  по формуле Бесселя. Также подсчитывалась разница между минимальным и максимальным отсчетами по серии ( $\max - \min$ ).

За опорные значения принимались средние значения из отсчетов по рейке при выключенном конвекторе. С опорными значениями сравнивались отсчеты по рейке, выполненные в условиях воздействия потоков воздуха:

$$\Delta = h_{\text{ср}}^{\text{конв}} - h_{\text{ср}}^{\text{опор}}, \quad (1)$$

где  $h_{\text{ср}}^{\text{конв}}$  – средний отсчет по рейке при включенном конвекторе;

$h_{\text{ср}}^{\text{опор}}$  – опорное значение среднего отсчета по рейке (конвектор выключен).

Результаты исследований представлены в табл. 1–3.

Из табл. 1 следует, что холодный поток воздуха никак не влияет на отсчет по рейке и точность визирования, изображение рейки при этом спокойное и четкое. При горячем потоке воздуха изображение рейки становится размытым (рис. 2б), совмещение биссектора со штрихом рейки вызывает затруднения. Зафиксировано увеличение средней квадратической ошибки взятия отсчета по рейке более чем в два раза: с 0,03–0,05 мм при спокойном изображении до 0,09–0,13 мм при потоке горячего воздуха. Кроме того установлено систематическое влияние горячего потока воздуха на отсчет: для расстояния 15 м наблюдается увеличение среднего отсчета по рейке на величину 0,15–0,18 мм.

Таблица 1

## Результаты лабораторных измерений с нивелиром Н-05

Условия измерений	Показатель	Расстояние от нивелира до рейки, м		
		6,5	14,0	15,5
без потока воздуха	$h_{\text{ср}}$ , мм	<b>1492,70</b>	<b>1582,38</b>	<b>1503,63</b>
	$m_h$ , мм	0,02	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$
	max – min, мм	0,10	0,17	0,09
поток горячего воздуха	$h_{\text{ср}}$ , мм	<b>1492,63</b>	<b>1582,56</b>	<b>1503,78</b>
	$m_h$ , мм	0,04	$\pm 0,13$	$\pm 0,09$
	max – min, мм	0,13	0,39	0,35
	$\Delta$ , мм	-0,07	+0,18	+0,15
поток холодного воздуха	$h_{\text{ср}}$ , мм	–	–	<b>1503,60</b>
	$m_h$ , мм	–	–	$\pm 0,03$
	max – min, мм	–	–	0,10
	$\Delta$ , мм	–	–	-0,03

Таблица 2

## Результаты лабораторных измерений с нивелиром DiNi 0.3

Условия измерений	Показатель	Расстояние от нивелира до рейки, м	
		6,5	15,5
без потока воздуха	$h_{\text{ср}}$ , мм	<b>1487,75</b>	<b>1519,56</b>
	$m_h$ , мм	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$
	max – min, мм	0,06	0,07
поток горячего воздуха	$h_{\text{ср}}$ , мм	<b>1487,69</b>	<b>1519,39</b>
	$m_h$ , мм	$\pm 0,01$	$\pm 0,04$
	max – min, мм	0,03	0,16
	$\Delta$ , мм	-0,06	-0,17
поток холодного воздуха	$h_{\text{ср}}$ , мм	–	<b>1519,56</b>
	$m_h$ , мм	–	$\pm 0,02$
	max – min, мм	–	0,05
	$\Delta$ , мм	–	0

Из табл. 2 следует, что для расстояния 15,5 м горячий поток воздуха искажает среднее значение отсчета по рейке, который уменьшается на 0,17 мм. Примечательно, что конвекционный поток горячего воздуха по-разному влияет на отсчеты по рейкам: при работе с оптическим нивелиром отсчет увеличивается на 0,18 мм, а при работе с цифровым нивелиром – уменьшается на 0,17 мм. Средняя квадратическая ошибка также увеличивается при горячем потоке воздуха, однако, и в этом случае она не превышает 0,05 мм.

В табл. 3 показано изменение превышения между осью вращения зрительной трубы тахеометра и штрихом рейки: при горячем потоке воздуха превышение увеличивается на 0,15 мм (отсчет по вертикальному кругу увеличивается на 2,3"). Точность визирования на штрих снижается из-за размытия изображения рейки и его легких колебаний (рис. 2б).

## Результаты лабораторных измерений с тахеометром Leica TCRP 1201+

Условия измерений	Показатель	Значение показателя для расстояния 14,078 м
без потока воздуха	средний отсчет по ВК	<b>-0° 0' 20,7''</b>
	$m_a$	±0,9''
	$h_{cp}$ , мм	<b>-1,41</b>
	$m_h$ , мм	±0,06
	max – min, мм	0,27
поток горячего воздуха	средний отсчет по ВК	<b>-0° 0' 18,4''</b>
	$m_a$	±2,2''
	$h_{cp}$ , мм	<b>-1,26</b>
	$m_h$ , мм	±0,15
	max – min, мм	0,52
	$\Delta$ , мм	+0,15

**Обсуждение**

В ходе исследований установлено, что на изменение отсчета по рейке влияет горячий поток воздуха. Для всех применяемых приборов при длине визирного луча 15 м систематическая ошибка взятия отсчета по рейке составила величину порядка 0,15 мм. Установлена интересная зависимость: при горячем потоке воздуха отсчеты по рейке, взятые цифровым нивелиром, меньше истинных (взятых при выключенном конвекторе), а отсчеты, полученные нивелиром Н-05 и тахеометром, – больше. Это связано с различным принципом взятия отсчета.

Видимое изображение штрихов рейки под действием горячих потоков воздуха несколько приподнимается, и при работе с цифровым нивелиром (или оптическим нивелиром без плоскопараллельной пластинки) отсчет относительно неподвижной сетки нитей воспринимается меньше истинного. В то же время, при работе способом «совмещения» наблюдатель наводит биссектор на сместившийся вверх штрих, и отсчет по барабанчику нивелира Н-05 или по вертикальному кругу (ВК) тахеометра увеличивается. Из вышесказанного можно сделать следующее предположение: при измерении превышения на станции двумя типами нивелиров (цифровым и оптическим с плоскопараллельной пластинкой) среднее из значений должно быть свободно от влияния вертикальной рефракции даже на местности с выраженным уклоном, т.е. при разной высоте визирного луча над подстилающей поверхностью при визировании «назад» и «вперед».

**Заключение**

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

– направленные вертикальные потоки горячего воздуха, встречающиеся на пути прохождения визирного луча, оказывают систематическое влияние на отсчет по рейке. При работе способом «совмещения» (нивелир Н-05, тахеометр)

отсчеты по рейке больше истинных, а при работе с цифровым нивелиром – меньше;

– величина систематической ошибки, вызванной потоками горячего воздуха, зависит от длины визирного луча: чем меньше расстояние от нивелира до рейки, тем меньше по абсолютной величине ошибка в отсчете по рейке. Поэтому рекомендуется при наличии локальных тепловых потоков воздуха сокращать длину визирного луча и повышать количество приемов измерений;

– наличие тепловых потоков воздуха приводит к размытию изображения рейки и к увеличению средней квадратической ошибки взятия отсчета по рейке в 2–3 раза. Наилучших по точности результатов можно достичь с применением цифрового нивелира, т.к. исключается ошибка наблюдателя, имеющая большое влияние при визировании на размытое и нечеткое изображение рейки;

– при измерении превышения на станции двумя типами нивелиров (Н-05 и DiNi 0.3) среднее значение ожидается свободным от влияния рефракции, так как из-за разных принципов взятия отсчета систематические ошибки за рефракцию имеют разный знак, но примерно одинаковы по величине.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлив П. В. Проблемы высокоточного нивелирования. – Львов: Вища школа, 1980. – 124 с.
2. Беспалов Ю. И., Терещенко Т. Ю. Лазерные маркшейдерско-геодезические измерения в строительстве / СПбГАСУ. – СПб., 2010. – 227 с.
3. Вшивкова О. В., Решетило С. Ю. Комбинированный способ учёта влияния вертикальной рефракции в электронной тахеометрии // Геодезия и картография. – 2019. – № 11. – С. 15–21. DOI 10.22389/0016-7126-2019-953-11-15-21.
4. Мозжухин О. А. К анализу путей развития проблемы учёта рефракции в нивелировании // Геодезия и картография. – 2016. – № 11. – С. 16–19. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-917-11-16-19
5. 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.
6. Островский А. Л. Достижения и задачи рефрактометрии // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 6–15.
7. Уставич Г. А. Об опыте исследования влияния рефракции на результаты точного нивелирования // Геодезия и картография. – 1975. – № 6. – С. 11–12.
8. Скрипников В. А., Скрипникова М. А. Исследование влияния турбулентности на погрешность визирования для автоматизированного тахеометра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т.1, № 1. – С. 217–222. DOI 10.33764/2618-981X-2019-1-1-217-222.
9. Дрок М. К. Исследование влияния вертикальной рефракции при одностороннем геодезическом нивелировании через водные пространства // Научные записки Львовского политех. ин-та. Сер. Геодезическая. – 1961. – № 6. – С. 154–182.
10. 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

© А. В. Никонов, В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, 2022