

ИЗЫСКАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ УЧЕТА НИВЕЛИРНОЙ РЕФРАКЦИИ

В соответствии с программой развития нивелирной сети в СССР до 1990 г. предусматривается использование результатов нивелирования при решении важных народнохозяйственных проблем, таких как переброска части стока северных рек в бассейн Волги; изучение современных вертикальных движений земной коры; комплексные исследования Мирового океана, для чего планируется проложение нивелирных ходов I класса вдоль побережья Тихого и Северного Ледовитого океанов, выявление вертикальных смещений зданий, сооружений и агрегатов промышленных предприятий и ряда других проблем.

Для успешного решения намеченной программы развития нивелирной сети перед советскими геодезистами стоят сложные задачи повышения производительности и точности прецизионных нивелирных работ.

Одной из причин, ограничивающей отрезки времени суток, когда возможно вести нивелирование I и II классов, а также искажающей результаты нивелирования наиболее нежелательными систематическими ошибками, является неоднородность атмосферы, особенно в нижнем трехметровом слое воздуха — в слое нивелирования. Неоднородность атмосферы по плотности вызывает ее турбулентное перемешивание и нивелирную рефракцию.

С целью ослабления погрешностей, вызываемых рефракцией, а также турбулентностью, проявляющейся колебанием изображений штрихов нивелирной рейки и затрудняющей точное наведение биссектора трубы нивелира на штрих рейки, действующей инструкцией предусмотрено выполнять наблюдения только в утренние и послеполуденные периоды, «причем начинать их через полчаса после восхода Солнца и заканчивать за час до его захода» [3, с. 33]. Кроме того, не разрешается выполнять нивелирование при колебаниях изображения.

Преодоление барьера неоднородности атмосферы позволило бы повысить производительность труда и точность нивелирования. Поэтому не случайно явление нивелирной рефракции изучается уже более 100 лет, а колебания изображений около 135 лет. Первые исследования нивелирной рефракции принадлежат русским ученым Н. Я. Цингеру (1872 г.), Д. Д. Геденову (1884 г.) [1].

Еще раньше в 1849 г. В. Я. Струве [8] обратил внимание на то, что существует связь между рефракцией и колебаниями изображений визирных целей. На основании работ В. Я. Струве и И. И. Померанцева [6], относящихся к тригонометрическому нивелированию, можно сделать следующие выводы:

1. Рефракционные аномалии (разности между действительными и нормальными значениями рефракций, названные В. Я. Стру-

ве угловыми пертурбациями) зависят от характера изображений визирных целей.

2. Рефракционные аномалии — линейные функции достоинства изображений. Они пропорциональны расстояниям от визирной цели до прибора. Эти крайне важные выводы справедливы и для нивелирной рефракции.

Важнейшими этапами исследования нивелирной рефракции следует считать установление характера действия рефракционных погрешностей; разработку методов и формул учета рефракции.

К настоящему времени можно считать окончательно установленным, что рефракция носит преимущественно систематический, а не случайный характер. Последнее особенно выражено на затяжных склонах, когда действие рефракции весьма опасно.

Наиболее совершенными формулами учета рефракции по измеренным метеоэлементам следует считать формулы, предложенные в [4], [5] и [2].

Первая из них имеет вид

$$\epsilon_{\text{мм}} = -0.00108 \frac{B}{760} \cdot \frac{t_1 - t_3}{(1 + \alpha t^2)} \left[\frac{L^2}{h} \cdot \frac{1 - \tau}{12} + \frac{(1 - \tau)^2}{24} \right], \quad (1)$$

где B — атмосферное давление, L — расстояние между рейками в метрах, $\alpha = 0.00366$; t_1, t_2, t_3 — температура воздуха на высоте визирного луча у задней рейки, у нивелира и у передней рейки

$$\tau = (t_3 - t_2)/(t_2 - t_1).$$

Формула, взятая из работы [5], записывается компактней

$$\Delta\rho = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma \cdot \frac{S^2}{50} \cdot (t_2 - t_1) \cdot h. \quad (2)$$

Здесь S — длина визирного луча, м; $(t_2 - t_1)$ — разность температур на высотах 0,5 и 2,5 м; h — превышение; γ — величина, выбираемая из таблиц и зависящая от температуры приземного слоя воздуха. Наконец, формула из [2] имеет вид

$$\Delta h_T = 0.0548 \cdot S^2 \cdot \frac{B}{T^2} \cdot \frac{\Delta T}{\ln Z_B/Z_H} \left(\frac{1}{h_{\text{вз}}} - \frac{1}{h_{\text{зн}}} \right), \quad (3)$$

где ΔT — разность температур, измеренных на высоте Z_H и Z_B нижнего и верхнего отсчетов по рейкам; $h_{\text{вз}}$ и $h_{\text{зн}}$ — эквивалентные высоты луча на заднюю и переднюю рейки; T — абсолютная температура воздуха.

В табл. 1 приведены результаты вычислений нивелирной рефракции по этим трем формулам. Результаты заимствованы из [7]. Экспериментальные исследования выполнены в июле 1979 г. Нивелиром НА-1 проводили систематические наблюдения на одной и той же нивелирной станции. Длина плеч нивелирования стандартная 50 м, превышение 2,4 м. На высотах прохождения визирного луча 0,5 и 2,9 м, а также на высоте прибора 1,6 м измеряли температуру и давление воздуха.

В табл. 1 приведены средние результаты наблюдений за два дня. Каждый час выполняли (только по основным шкалам) 9—10 наблюдений превышений и метеоэлементов. Измеренную рефракцию определяли как разность превышений, измеренных стандартным и коротким лучем (длиной 16,6 м). Точность измеренной рефракции оценивается средней квадратической ошибкой 0,035 мм. Точность вычисления рефракции по формулам (1), (2), (3) составляют соответственно (без погрешностей измеренной рефракции): 0,085, 0,056 и 0,044 мм.

Таблица 1

Значение нивелирной рефракции (мм) при неустойчивой температурной стратификации, полученное из измерений и по формулам (1), (2), (3)

Рефракция	Время								
	9	10	11	12	14	15	16	17	18
Измеренная	0,11	0,16	0,22	0,30	0,36	0,35	0,32	0,23	0,18
Вычисленная по (1)	0,10	0,12	0,16	0,18	0,19	0,22	0,20	0,19	0,17
Вычисленная по (2)	0,12	0,17	0,19	0,23	0,26	0,24	0,22	0,20	0,16
Вычисленная по (3)	0,18	0,26	0,33	0,33	0,38	0,35	0,30	0,23	0,16

Сравнительно высокая точность определения рефракции по формулам получилась благодаря усредненным измеренным метеоэлементам (усреднено 18—20 измерений).

В действительности при нивелировании на отдельной станции измерение метеоэлементов будет менее надежным, поскольку окажется не 20 измерений, а вероятнее всего два. Следовательно, полученные погрешности определения рефракции необходимо по крайней мере утроить. Тогда даже самая точная формула (3) дает погрешность 0,132 мм, т. е. во многих случаях погрешность такая же, как и рефракция. К тому же вычисления рефракции требуют определения эквивалентной высоты луча на каждом плече.

В этой связи следует признать актуальными поиски новых методов учета нивелирной рефракции.

Весьма эффективным, как с точки зрения учета рефракции, так и расширения периодов суток, в которые появляется возможность вести нивелирование, является метод, основанный на свойстве атмосферы стремиться под действием силы тяжести к устойчивому равновесию и даже при сверхадиабатических вертикальных градиентах температуры достичь безразличного, равновесного состояния (нейтральной стратификации).

Равновесному состоянию (короткие периоды наилучшей видимости утром и вечером) соответствует нормальная рефракция, которая (при равных плечах) одинаково искажает отсчет по зад-

ней и передней рейке и не влияет на превышения. К сожалению, указанные периоды составляют при ясной погоде 15...20 мин.

Дальнейший нагрев Солнцем земной поверхности, а затем нижних частичек воздуха ведет к тому, что сильно нагретые частички под действием выталкивающей силы поднимаются вверх, попадают в более холодные слои и под действием силы тяжести снова опускаются вниз, стремясь достичь устойчивого равновесия, но из-за выталкивающего действия сил частичкам удается достигнуть только положения, существующего при равновесной стратификации.

В поле зрения трубы описанные движения частичек воздуха проявляются как колебания штрихов рейки со всевозрастающей амплитудой A_i . При этом, несмотря на возрастание амплитуды, нижние пики колебаний (в трубе с обратным изображением — верхние пики) будут находиться на одном уровне (на уровне, который соответствует равновесной стратификации воздуха). Этому уровню, как уже говорилось, соответствует нормальная стратификация.

Следовательно, если бы наблюдатель улавливал это нижнее (в трубе — верхнее) положение штриха рейки, то результаты нивелирования были бы свободны от нивелирной рефракции.

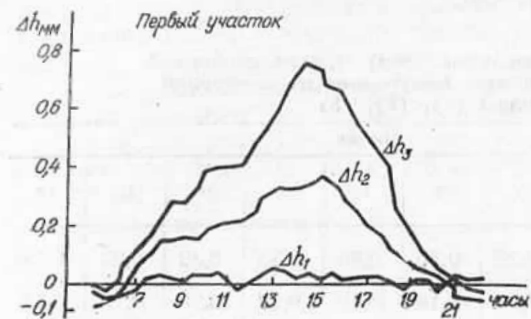
Наоборот, если бы наблюдатель улавливал верхнее положение штриха (в трубе — нижнее), результаты наблюдений были бы обременены двойным значением рефракции. Так как наблюдатель улавливает среднее положение колеблющегося штриха, то наблюдаемые превышения отягощены дифференциальной рефракцией. Такова основа метода.

Измерение рефракции в превышениях на протяжении дня при различных методах наблюдений.

На рисунке показаны результаты описанных выше закономерностей действия нивелирной рефракции, выполненной в августе 1980 г. На этом рисунке

$$\Delta h_1 = h_1 - h_{э\tau}, \quad \Delta h_2 = h_2 - h_{э\tau}, \quad \Delta h_3 = h_3 - h_{э\tau}. \quad (4)$$

Эталонные превышения $h_{э\tau}$ получены коротким лучом; h_1, h_2, h_3 получены стандартным лучом, когда фиксировали верхнее (видимое в трубе), среднее (как обычно) и нижнее положения колеблющегося штриха рейки соответственно; $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$ — значения



нивелирной рефракции в различные часы дня и при разных методах наблюдений.

Как видим, значения Δh_1 не превышают погрешностей измерений в течение всего дня; Δh_3 в два раза больше Δh_2 при амплитуде колебаний штриха до 2,8 мм (до 12...13 ч). При амплитудах более 2,8 мм (14...17 ч) такая закономерность несколько нарушается, что вполне объясняется понижением точности отсчитывания сильно колеблющихся штрихов рейки.

Таким образом, в целом фиксация верхнего положения колеблющихся штрихов рейки ведет не только к исключению рефракции, но и позволяет удлинить время производства высокоточного нивелирования.

Для более детального изучения процесса о возможности удлинения времени производства нивелирования необходимо исследовать характер зависимости точности

отсчетов штрихов рейки от амплитуды колебания этих штрихов. Так как фиксация колеблющихся штрихов в каждом приеме производилась дважды, то это позволяет оценить точность отсчетов или превышений по формуле двойных измерений

$$m_n = \sqrt{[\Delta\Delta]/2n}. \quad (5)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 2. Из таблицы следует, что точность фиксации верхнего и среднего положения штрихов рейки примерно одинаковая; при увеличении амплитуды колебаний с 0,6 мм до 2,5 мм ошибка превышения увеличивается примерно только на 15...20%; средняя квадратическая ошибка превышения из приема при амплитуде колебаний 0,6 до 2,5 мм составляет 0,094 мм; при нивелировании I класса, когда будут отсчитываться основная и дополнительная шкалы, с учетом левой и правой нивелировки средняя квадратическая ошибка на станции составит около 0,05 мм. Такая погрешность вполне удовлетворяет действующую инструкцию по нивелированию.

Предлагаемый метод позволяет вести нивелирование и учитывать рефракцию начиная с окончания утренних периодов спокойных изображений до 12 ч и начиная с 15 ч до начала периода спокойных изображений в вечернюю видимость. В периоды равновесной атмосферы целесообразно вести нивелирование обычным методом. При этом следует опасаться инверсионной стратификации воздуха.

Список литературы: 1. Геденов Д. Д. О выгоднейшем способе нивелирования. — Записи ВТО Главного штаба. СПб., 1884, ч. 34. — 32 с. 2. Джуман Б. М., Павлив П. В., Стацшин И. И. Метод определения нивелирной ре-

Таблица 2
Вычисление погрешностей превышений

Количество приемов	Амплитуда колебаний, мм	Погрешность превышений (из полуприема), мм		
		Δh_1	Δh_2	Δh_3
77	0,57	0,173	0,139	0,173
69	0,87	0,122	0,124	0,159
82	1,53	0,127	0,132	0,182
76	1,88	0,112	0,178	0,190
80	2,28	0,161	0,137	0,209
57	2,84	0,179	0,120	0,252
16	3,15	0,192	0,150	0,239

фракции. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1979, вып. 30, с. 66—69.

3. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. — М.: Недра, 1974. — 160 с.

4. *Красовский Ф. Н.* О временной постановке высокоточного и точного нивелирования. — М.: Геодезиздат, 1956, т. 2. — 557 с.

5. *Куккамьяки Т. Н.* Формулы и таблицы для вычисления нивелирной рефракции. — Публикации финского геодезического института, 1939, № 27, с. 18—25.

6. *Померанцев Н. А.* Исследование земной рефракции. — Приложение к 18-му тому Записок Академии наук, 1884, № 3. — 76 с.

7. *Стацшин И. И.* Разработка и исследование методов учета нивелирной рефракции в турбулентной атмосфере: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Львов, 1983. — 24 с.

8. *Struwe W.* Beschreibung der zur Ermittlung des Höhenunterschiedes dem Schwarzen und dem Caspischen Meere... ausgeführten Messungen. СПб, 1849. — 150 S.

Статья поступила в редколлегию 14. 01. 85