

В первом случае изучалась связь между различными сериями измерения угла [1], во втором — между коэффициентами рефракции направлений [2].

Оценку точности коэффициента Фехнера производили по разностям

$$\delta = i_{\phi} - r, \quad m_{i_{\phi}} = \pm \sqrt{\frac{[85]}{n}}, \quad (2)$$

где i_{ϕ} — коэффициент Фехнера; r — коэффициент корреляции. Оценка точности в первом случае дала результат $m_{i_{\phi}} \approx \pm 0,22$, во втором $m_{i_{\phi}} \approx \pm 0,16$. Таким образом, с увеличением выборок

Таблица 1

Сравнение эмпирического коэффициента корреляции с коэффициентом Фехнера в случае небольших выборок

Номер выборки	i_{ϕ}	r	Номер выборки	i_{ϕ}	r
1	0,22	0,38	11	0,11	0,38
2	0	0,21	12	0,33	0,25
3	0,22	0	13	0,33	0,21
4	0,22	0	14	0	0
5	-0,11	0	15	0,11	0,38
6	0,33	0,38	16	-0,11	0,25
7	0,11	0,25	17	0,22	0,21
8	0,11	0,21	18	0,55	0,38
9	0,33	0	19	0	0,25
10	0,22	0	20	0,22	0,38

Таблица 2

Сравнение эмпирического коэффициента корреляции с коэффициентом Фехнера в случае больших выборок

Номер выборки	i_{ϕ}	r	Номер выборки	i_{ϕ}	r
1	0,42	0,59	11	0,83	0,84
2	0,14	0,04	12	0,79	0,89
3	0,10	0,33	13	0,70	0,81
4	0,88	0,83	14	0,77	0,90
5	0,67	0,90	15	0,41	0,61
6	0,63	0,89	16	0,51	0,75
7	0,88	0,94	17	0,70	0,78
8	0,68	0,85	18	0,48	0,70
9	0,84	0,89	19	0,26	0,49
10	0,80	0,85	20	0,29	0,35

точность увеличивается. Необходимо, правда, отметить тенденцию занижать степень тесноты связи по сравнению с коэффициентом корреляции.

Коэффициент Фехнера по сравнению с коэффициентом корреляции вычисляется в 3—5 раз быстрее. Эффективность вычисления i_{ϕ} по сравнению с r увеличивается с увеличением объема выборки. Так, даже для очень больших выборок коэффициент Фехнера можно вычислить сравнительно быстро. Достоверность его может удовлетворить, на наш взгляд, те стороны геодезической вычислительной практики, где не нужно знать степень коррелированности с большой точностью. Кроме того, вычисление i_{ϕ} перед вычислением коэффициента корреляции покажет, какого результата ожидать при дальнейших расчетах.

Список литературы: 1. Кемниц Ю. В. Обработка зависимых результатов измерения. — М.: Недра, 1970. — 188 с. 2. Мигале Н. К., Хавская Л. С. Исследование стохастической зависимости между коэффициентами рефракции различных направлений. — Геодезия, картография и аэрофотоизъемка, 1973, вып. 18, с. 34—38. 3. Ферстер Э., Ренц В. Методы корреляционного и регрессионного анализа. — М.: Финансы и статистика, 1983. — 302 с.

Статья поступила в редакцию 08. 10. 84

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 бассейны 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 расстояния 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 действительные рефракции весьма опасны.

Наиболее совершенными формулами учета рефракции по современным метеозлементом 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 компактной

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

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

$$\Delta h_r = 0.0548 \cdot S^2 \cdot \frac{B}{T^2} \ln \frac{Z_v}{Z_n} \left(\frac{1}{h_a} - \frac{1}{h_{an}} \right), \quad (3)$$

где ΔT — разность температур, измеренных на высоте Z_n и Z_v нижнего и верхнего отсчетов по рейкам; h_a и h_{an} — 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 m , превышение 2,4 m . На высотах прохождения визирного луча 0,5 и 2,9 m , а также на высоте прибора 1,6 m 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 метеозлементов. Измеренную рефракцию определяли как разность превышений, измеренных стандартным и коротким лучем (длиной 16,6 m). Точность измеренной рефракции оценивается средней квадратической ошибкой 0,035 mm . Точность вычисления рефракции по формулам (1), (2), (3) составляют соответственно (без погрешностей измеренной рефракции): 0,085, 0,056 и 0,044 mm .

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

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

В действительности при нивелировании на отдельной станции измерение метеозлементов будет менее надежным, поскольку окажется не 20 измерений, а вероятнее всего два. Следовательно, погрешности определения рефракции необходимо по крайней мере утроить. Тогда даже самая точная формула (3) дает погрешность 0,132 mm , 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.

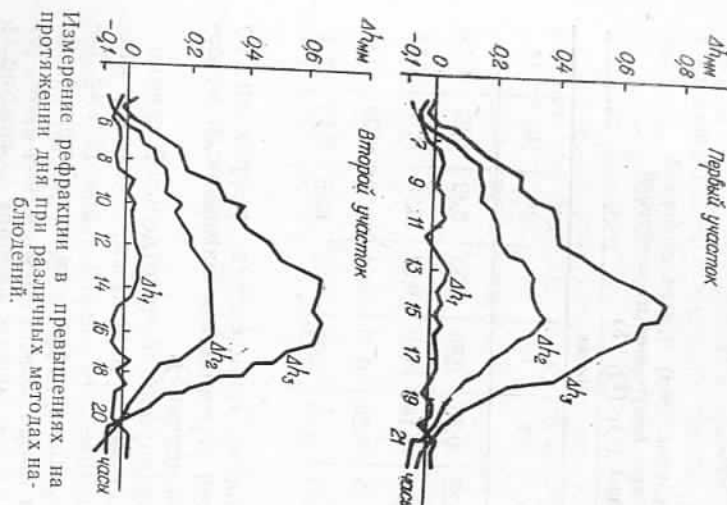
Весьма эффективным, как с точки зрения учета рефракции, так и расширения периодов суток, в которые появляется возможность вести нивелирование, является метод, основанный на свойстве атмосферы стремиться под действием силы тяжести к устойчивому равновесию и даже при сверхадиабатических вертикальных градиентах температуры достигая 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 превышение. 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 до-

стигнать только положения, соответствующего при равновесной стратификации.

В поле зрения трубы оптические движения частичек воздуха проявляются как колебания штрихов рейки со всевозрастающей амплитудой Δh . 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.



Измерение рефракции в превышениях на протяжении для различных методов наблюдений.

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

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

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

Эталонные превышения $h_{\text{эт}}$ получены коротким лучом; h_1, h_2, h_3 получены стандартным лучом, когда фиксировали верхнее (видимое в трубе), среднее (как обычно) и нижнее положение 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_2 в два раза больше Δh_1 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.

Т а б л и ц а 2
Вычисление погрешностей превышений

Код-номер препов	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

велирования.

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 производится дважды, то это позволяет оценить точность отсчетов или превышений по формуле двойных измерений

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

Результаты вычислений приведены в табл. 2. Из таблицы следует, что точность фиксации верхнего и среднего положения штрихов рейки примерно одинакова; 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. — Записки ВТО Главного штаба, СПб., 1884, ч. 34, — 32 с. 2. Джудин Б. М., Паслав П. В., Стацкини И. И. Метод определения нивелирной ре-

Фракции. — Геодезия, картография и аэрофотоосъемка, 1979, вып. 30, с. 66—69.
3. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. — М.: Недра, 1974. — 160 с.
4. Кривошей Ф. Н. О временной постоишке высокоточного и точного нивелирования. — М.: Геодезиздат, 1956, т. 2. — 557 с.
5. Кукушкин Т. Н. Формулы и таблицы для вычисления нивелирной рефракции. — Публикация финского геодезического института, 1939, № 27, с. 18—25.
6. Пожарников Н. А. Исследование земной рефракции. — Приложение к 18-му тому Записок Академии наук, 1884, № 3. — 76 с.
7. Стрелин Н. И. Разработка и исследование методов учета нивелирной рефракции в турбулентной атмосфере: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Львов, 1983. — 24 с.
8. Struve W. Beschreibung der zur Ermittlung des Höhenunterschiedes dem Schwarzen und dem Caspischen Meere... ausgeführten Messungen. СПб, 1849. — 150 S.

Статья поступила в редакцию 14. 01. 85

УДК 528.44

Л. Н. ПЕРОВИЧ, Е. Ю. ИЛЬКИН

ОБ ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Среди задач, решаемых прикладной геодезией, важное место принадлежит определению деформаций инженерных сооружений и оборудования, обусловленных осадками. Наиболее распространенным методом определения осадок является высокоточное геометрическое нивелирование короткими лучами [2, 4]. При этом возникают трудности в оценке точности измеренных величин, связанные прежде всего с тем, что нивелирование выполняется в различных специфических условиях. Например, в цехах газокomp-рессорных станций (ГКС) к таким факторам следует отнести: стесненные условия, что приводит к значительным неравенствам плеч (до 10 м) на станции; плохую освещенность; влияние вибрации работающих механизмов; неравномерное тепловое поле. Поэтому использование инструкции [5] не всегда приемлемо.

Нами поставлена задача произвести оценку точности и установить допуски для производства высокоточного геометрического нивелирования в производственных помещениях ГКС магистральных газопроводов. Для решения этой задачи использован производственный материал, накопленный при наблюдении за деформациями инженерных сооружений газопроводов «Союз», «Братство», «Уренгой—Ужгород». Измерения проводили нивелиром НА-1 и одной инварной рейкой при двух горизонтах прибора [2]. Для оценки использованы разности превышений и высот нулей шкал реек, измеренных на станции, а также невязки ходов. Все данные были разбиты на четыре группы в зависимости от условий наблюдений:

— газотурбинные цехи (ГТЦ) газопровода «Союз» (с агрегатами ГТК-10 и);

— ГТЦ газопровода «Братство» (с агрегатами ГТК-10);
— газокomp-рессорные цехи (ГКЦ) газопровода «Братство» (с установками МК-8);

— ГТЦ газопровода «Уренгой—Ужгород» (с агрегатами ГТК-25-1);

Обработка по разностям двойных равнооточных* измерений вк.начала [1]:

— вычисление разностей d_i превышений h_i и h_{i+1} , измеренных при двух горизонтах на i -й станции нивелирования

$$d_i = h_i - h_{i+1}; \quad (1)$$

— исключение грубых ошибок;
— выявление систематических ошибок по критерию

$$|d| \leq 0,25 |d|, \quad (2)$$

В случае невыполнения условия (2) находят остаточную систематическую ошибку

$$z_{cp} = \frac{|d|}{n}, \quad (3)$$

где n — число двойных разностей.

Средняя квадратическая ошибка превышения составляет

$$m_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[d^2]}{n}}, \quad (4)$$

а в случае невыполнения условия (2) —

$$m_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[d'^2]}{n}}, \quad (5)$$

где $d' = d - \delta_{cp}$.

Для оценки точности по разностям двойных измерений использовано 574 пары превышений, измеренных в ГТЦ «Союз», 547 — в ГТЦ «Братство» и 130 — в ГКЦ, 79 — в ГТЦ «Уренгой—Ужгород». Полученные средние квадратические ошибки (табл. 1) измеренных превышений хорошо отражают условия наблюдений. Так, в ГТЦ газопровода «Союз» по сравнению с ГТЦ «Братство» значительно лучше освещенность, более стабильное температурное поле, меньше влияние вибрации. Систематических ошибок по критерию (2) не обнаружено.

Оценка точности нивелирования по невязкам проводилась по следующей программе [1]:

* Результаты, полученные при обработке измерений как неравнооточных (с выбором весов в зависимости от длины и разности плеч на станции), существенно не отличаются от полученных значений для равнооточных измерений. Это связано с тем, что помимо длины плеч на точность измерений значительно влияют другие факторы (температурные воздействия, неравномерное тепловое поле, вибрация и т. д.), учесть которые при выборе весов трудно.