

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ НУЛЕВЫХ РЕФРАКЦИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УГЛОВ В СЕТЯХ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Для повышения точности угловых измерений в сетях триангуляции важное значение имеет выбор наивыгоднейшего времени их измерения. Выбор времени обусловлен систематическим влиянием на результаты измерений боковой рефракции. Поскольку боковая рефракция имеет явно выраженный суточный ход, поставленная задача сводится к определению моментов времени, когда рефракции нет или когда она меняется по знаку. Такие моменты времени принято называть моментами нулевых рефракций, которые наступают в периоды изотермии атмосферы. В результате многочисленных исследований [3—11] сформулированы следующие методы определения моментов нулевых рефракций:

- по колебаниям изображений визирных целей;
- по вертикальному градиенту температуры, определяемому по вертикальной разности температуры на пункте наблюдения;
- по значению радиационного баланса, измеряемого на пункте наблюдения;
- по отклонению измеряемого зенитного расстояния от его теоретического значения.

Каждый из указанных методов проверяли экспериментально в определенных физико-географических условиях, присущих только данному месту, времени, погоде и, естественно, наблюдателю. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Определение изотермии по колебаниям изображений визирных целей в значительной степени зависит от опытности наблюдателя, неодновременности затухания колебаний по всем измеряемым направлениям, запоминания наблюдателем изображений предыдущих целей, увеличения трубы, формы и цвета визирной цели. Амплитуда колебаний изображений характеризует состояние атмосферы на всем протяжении визирного луча.

Второй и третий методы отличаются своей простотой и на равнинной или слегка всхолмленной местности дают хорошие результаты. В сильно пересеченной местности с большими перепадами

высот вертикальный градиент температуры и радиационный баланс не отображают действительной картины состояния атмосферы на всем протяжении визирного луча. Показания приборов в значительной степени зависят от репрезентативности пунктов наблюдения, порывов ветра, передвижения облаков и других факторов. Этот недостаток устранен в четвертом методе, в котором моменты изотермии определяют по разности измеренных и теоретических зенитных расстояний. Благодаря этому, в процессе наблюдений мы получаем интегральное значение вертикального градиента температуры по всей линии визирования. Однако для этого нужно одновременно с горизонтальными углами измерять и зенитные расстояния и иметь отметки наблюдаемых пунктов. Определив моменты наступления изотермии, можно в дальнейшем так строить программу (измерения) углов, чтобы в значительной степени исключить влияние рефракции.

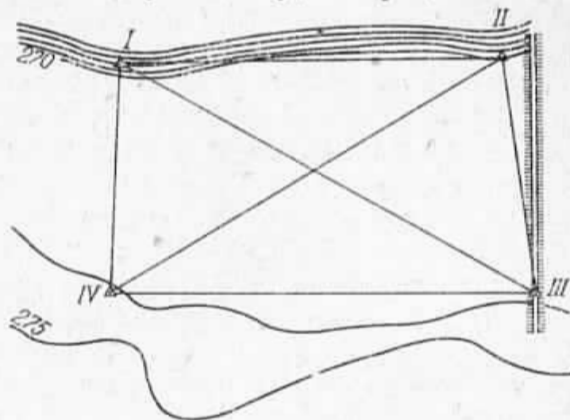


Рис. 1. Схема экспериментальной сети.

Таким образом, возникает необходимость в одновременной экспериментальной проверке всех методов определения моментов минимальных искажений углов в одних и тех же физико-географических условиях, что позволит выявить преимущества и недостатки каждого из них и определить наиболее оптимальный.

Для экспериментальных работ был выбран район озера в г. Бережаны Тернопольской обл. В качестве пунктов наблюдения взяты четыре пункта спецсети, расположенные на берегу озера. Расстояния между пунктами по диагонали четырехугольника составляли 2,0 ... 2,5 км, минимальные расстояния — 0,95 ... 1,0 км. Схема сети представлена на рис. 1.

Направление I—II проходило вдоль довольно крутого берега озера, обращенного к югу, и следовательно, должно находиться в области значительных рефракционных влияний. Направление II—III пролегало почти параллельно дамбе и также должно быть подвержено температурным влияниям дамбы. Остальные направления проходили над водной поверхностью озера и не должны сильно искажаться влиянием рефракции.

Наблюдения на пунктах I, II, III выполняли в августе при солнечной и слегка облачной погоде, а на пункте IV — при пасмурной циклонической погоде. Горизонтальные углы и зенитные расстояния измеряли теодолитом ОТ-02 со штатива. Визирными целями служили марки полигонометрического комплекта, также устанавливаемые на штативах. Теодолит и штатив тщательно защищали от воздействия солнечных лучей. В ночное время ни теодолит, ни марки со штативов не снимали.

Измерение горизонтальных углов выполняли способом во всех комбинациях. В каждом приеме углы определяли в такой последовательности: (1.2), (1.3), (2.3), т. е. угол (1.3), равный сумме (1.2) и (2.3), измеряли в середине приема. При этой последовательности измерений углов влияние рефракции не должно сказываться на их взаимной связи, а отличие суммы углов (1.2) и (2.3) от (1.3) должно характеризовать качество работ. В связи с этим во время измерения одного полного приема (1.2), (1.3) и (2.3) перестановку лимба не производили, а осуществляли только между полными приемами (при $m=24$). Каждый прием начинали и заканчивали измерением зенитных расстояний. В это время фиксировали условия видимости и качество изображений визирных целей. Параллельно с угловыми измерениями на пункте определяли температуру, радиационный баланс, давление и скорость ветра. Температуру измеряли на высотах 1,5 и 5 м, остальные величины — на высоте 1,5 м. Все наблюдения выполнены в послеполуденное время (15...20 ч), так как утренние видимости из-за тумана над озером использовать было невозможно. На пунктах *I*, *II*, *III* наблюдения вели по два дня, на пункте *IV* из-за метеорологических условий — один день. При этом на пунктах *I*, *II*, *III* выполнено по 25 приемов, на пункте *IV* — 11 приемов. Метеорологические элементы фиксировали в периоды угловых измерений через 0,5 ч.

В связи с тем что угловые измерения и измерения метеозаписей на каждом пункте вели не только в периоды спокойных изображений (30...40 мин), а значительно дольше (4...5 ч), то в начале и в конце измерений углы были значительно обременены действием боковой рефракции, что проявилось в виде явно выраженного хода отдельных углов в течение видимости, достигающего для отдельных углов почти 10". Хотя общепринятую оценку точности измерений на каждом пункте не производили, но выполненная по сходимости углов (1.2)+(2.3) — (1.3), она в каждом приеме составляла 0,8...0,9", т. е. вполне удовлетворительна.

Явно выраженный ход имели и измеренные зенитные расстояния. Особенно это наблюдалось на пунктах *I* и *II*. По полученным данным для каждого момента наблюдений вычисляли разности зенитных направлений, образующих углы (1.2), (2.3) и (1.3). Минимальные разности измеренных зенитных расстояний, как и нулевые значения вертикального градиента температуры и радиационного баланса, должны совпадать с равновесным состоянием атмосферы, исходя из следующих соображений.

Как известно [2], коэффициент вертикальной рефракции можно вычислить по формулам:

$$\kappa = 668,7 \frac{B}{T^2} (0,0342 + a + \gamma) - 14,8 \frac{e}{T^2}; \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{2R}{S \cdot \rho''} \cdot \delta''_z, \quad (2)$$

где B — давление атмосферы; T — абсолютная температура; e — упругость водяных паров; a — нормальный градиент температуры; γ — аномальный вертикальный градиент температуры; S — длина линии визирования; R — средний радиус Земли; δ_z — угол частной вертикальной рефракции.

Решая (1) и (2) относительно δ_z и учитывая, что последний член в формуле (1) для практических целей не играет существенного значения, получаем

$$\delta_z = 10,82 \frac{B \cdot S}{T^2} (0,0342 + a + \gamma). \quad (3)$$

Зависимость между измеренным Z_n и теоретическим Z_T зенитными расстояниями выразим в виде

$$Z_T = Z_n + \delta_z,$$

или

$$Z_T = Z_n + \delta_B + \delta_T, \quad (4)$$

где δ_B — составляющая вертикальной рефракции, обусловленная барическим градиентом; δ_T — составляющая вертикальной рефракции, обусловленная вертикальным температурным градиентом.

При этом

$$\delta_B = 0,370 \frac{B \cdot S}{T^2}, \quad \delta_T = 10,82 \frac{B \cdot S}{T^2} (a + \gamma). \quad (5)$$

Разность двух зенитных расстояний будет

$$Z_{T_2} - Z_{T_1} = Z_{n_2} - Z_{n_1} + \delta_{B_2} - \delta_{B_1} + \delta_{T_2} - \delta_{T_1}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) значение (5) и полагая, что в периоды спокойных изображений $B_2 \approx B_1 = B$; $T_2 \approx T_1 = T$; $\gamma_2 \approx \gamma_1 = 0$, получаем

$$\Delta Z_T = \Delta z_n + 0,370 \frac{B}{T^2} (S_2 - S_1) - 0,070 \frac{B}{T^2} (S_2 - S_1). \quad (7)$$

Для $B = 750$ мм и $T = 290^\circ \text{C}$ будем иметь

$$\Delta Z_T + \Delta Z_n + 0,002 (S_2 - S_1), \quad (8)$$

т. е. разность двух измеренных зенитных расстояний в период спокойных изображений стремится к теоретической разности этих расстояний. Второй член формулы (8) имеет ощутимое значение лишь при разности расстояний около 1000 м. Таким образом, по минимальной разности измеренных зенитных расстояний можно судить о минимальных рефракционных искажениях углов так же, как и по радиационному балансу и вертикальному градиенту температуры.

Так как измерения углов и зенитных расстояний на каждом пункте по времени не совпадали, что затрудняло провести простое усреднение результатов, то для дальнейшей обработки последние были получены методами реализации случайной функции для мо-

ментов времени кратных 0,5 ч [1]. Для примера на рис. 2 представлены полученные реализации всех величин на п. I. При этом для наглядности $\beta_{1,2}$ и ΔZ даны в секундах, а R , γ и C — в условных единицах.

На рис. 2 видно, что периоды наступления спокойных изображений и периоды минимальных значений ΔZ хорошо согласуются между собой, хорошо согласуются по времени и нулевые значения

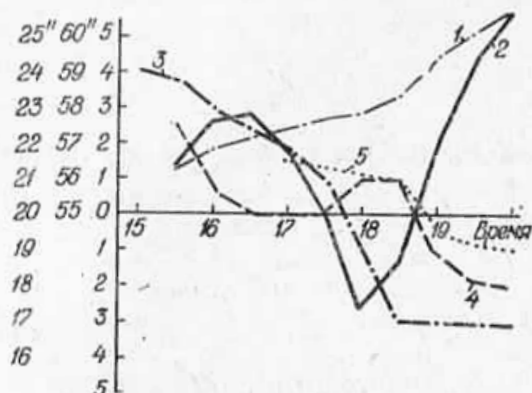


Рис. 2. Дневной ход угловых и метеорологических величин на п. I: 1 — горизонтальный угол; 2 — разность зенитных расстояний между вторым и первым направлениями; 3 — колебания изображений; 4 — вертикальный градиент температуры; 5 — радиационный баланс.

R и γ . Однако время наступления спокойных изображений, ΔZ и R , γ имеет заметные различия. Подобные различия имели место и на других пунктах.

По реализациям углов в каждом сечении найдены невязки треугольников, а по ним вычислены средние квадратические ошибки измерения углов. Их результаты приведены в табл. 1.

По данным табл. 1 четко прослеживается дневной ход угловых невязок и явно выраженный ход средних квадратических ошибок. Минимальные невязки треугольников имеют место в периоды нулевых значений метеозлементов. Большие по значению невязки, как и предполагалось ранее, имеют место в треугольниках, образованных сторонами I—II и II—III.

Таблица 2
Невязки треугольников
в зависимости от метода
определения наилучшего периода
видимости

Треугольники	C	ΔZ	γ	R
I				
II	+2,84"	+3,06"	+5,08"	+4,70"
III				
II	+3,22	+2,82	+2,80	+2,76
III				
I	+2,14	+2,14	+1,70	+1,70
II				
III	+1,14	+1,00	-0,80	-0,44
IV				
μ	$\pm 1,42$	$\pm 1,38$	$\pm 1,76$	$\pm 1,65$

Таблица 1
Дневной ход невязок треугольников

Время, ч—мин	I III	I IV	I III IV	II III IV	μ
15—30	+5,0"	-1,1"	+1,5"	+7,6"	$\pm 2,68$
16—00	+4,7	-0,9	-0,3	+5,3	$\pm 2,06$
16—30	+3,9	-0,7	-0,7	+3,7	$\pm 1,58$
17—00	+2,8	+0,3	+0,1	+2,6	$\pm 1,11$
17—30	+2,6	+1,9	+1,2	+2,1	$\pm 1,16$
18—00	+3,8	+3,1	+1,9	+2,5	$\pm 1,68$
18—30	+2,8	+2,2	+2,4	+2,9	$\pm 1,50$
19—00	+3,7	+0,3	+1,7	+5,0	$\pm 1,86$
19—30	+7,5	-0,6	+0,5	+8,6	$\pm 3,30$

Для сравнения различных способов определения моментов минимальных рефракционных влияний по минимальному значению S , ΔZ , R и γ на каждом пункте выбраны пять значений углов, вычислены средние значения, а по ним найдены невязки треугольников и произведена оценка точности угловых измерений. Результаты этих вычислений приведены в табл. 2.

Анализ данных таблицы показывает, что в треугольниках, расположенных над однородной поверхностью (треугольники II—III—IV, III—I—IV) независимо от способа определения моментов изотермин, невязки почти одинаковы. В облачную и пасмурную погоду невязки треугольников значительно меньше, чем в солнечную погоду. Как и следовало ожидать, колебания изображений и минимальные разности измеренных зенитных расстояний более надежно определяют время наступления минимальных искажений углов действием боковой рефракции.

Список литературы: 1. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. 2. *Изотов А. А., Пеллинен Л. П.* Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — Тр. ЦНИИГАиК, 1955, вып. 102. 3. *Островский А. Л.* О суточном ходе угловых невязок треугольников, вызванном боковой рефракцией. — Науч. зап. ЛПИ. Сер. геодезическая, 1962, вып. 82. 4. *Островский А. Л.* К вопросу программы угловых измерений при свето- и радиодальномерной полигонометрии. — Инженерная геодезия, 1964, № 1. 5. *Островский А. Л., Тартачинский Р. М.* Опыт применения программы угловых измерений, симметричной относительно моментов изометрии воздушных масс, в южном степном районе. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1965, вып. 3. 6. *Островский А. Л., Сидорик Р. С.* Определение промежутков времени суток с минимальным действием земной рефракции по радиационному балансу. — Инженерная геодезия, 1966, вып. 3. 7. *Островский А. Л.* Геодезический метод построения симметричной программы наблюдения горизонтальных углов. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1967, вып. 6. 8. *Островский А. Л., Тартачинский Р. М.* Исследования боковой рефракции в Заполярье. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1969, вып. 10. 9. *Тартачинский Р. М.* Зависимость изменения боковой рефракции от радиационного баланса в горной местности. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1973, вып. 18. 10. *Хижак Л. С.* Исследование влияния рефракционных полей, образующихся над залесенной равнинной местностью, на точность измерения углов в триангуляции. — В кн.: Науч. работы аспирантов ЛПИ, 1963, № 2. 11. *Яковлев Н. В.* К теории и практике учета суточного хода рефракции при угловых измерениях и азимутальных определениях в геодезических сетях. — Геодезия и картография, 1969, № 8.