

А. Л. ОСТРОВСКИЙ, С. И. ПЛАХОТНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВО ВСХОЛМЛЕННОМ РАЙОНЕ

В случае равнинной местности наиболее простым и в то же время наиболее достоверным методом определения показателя преломления электромагнитных волн, близкого к истинному, является измерение метеозлементов в ряде точек на пути луча. Однако такой метод трудно применим в случае всхолмленной, а тем более горной местности, так как он требует установки метеорологических приборов на значительной высоте. Ни дисперсиомером, ни микроволновым рефрактометром мы не располагаем.

В работах (1, 3) предлагается определять средне-интегральное значение показателя преломления n на пути светового луча по измерениям зенитных расстояний, выполняемым одновременно со светодальномерными определениями.

Однако метод непосредственного определения n по измерениям зенитных расстояний имеет существенный недостаток: он не учитывает непараллельности изотермических и изобарических поверхностей. В самом деле, если изобарические поверхности с достаточной точностью параллельны уровенной поверхности, то изотермические поверхности в случае плавного рельефа довольно хорошо следуют за рельефом местности. С другой стороны, зная характер расположения изобарических поверхностей, можно считать, что среднее давление на пути луча близко к полусумме давлений, измеренных на концах линии, то есть

$$\bar{B} \approx \frac{B_1 + B_2}{2}. \quad (1)$$

Что касается влажности, то $e \neq \frac{e_1 + e_2}{2}$. Тем не менее, в случае светодальномерных измерений всегда можно положить, что

$$\bar{e} \approx \frac{e_1 + e_2}{2}. \quad (2)$$

При таком допущении погрешности в измеряемой линии длиной 25—30 км будет пренебрегаемо малы. Иначе обстоит дело с температурой. Именно в определении среднеинтегрального значения температуры — \bar{T} и заключается вся трудность задачи. Формула М. Т. Прилепина [3], предложенная для такой цели, основана на предположении существования определенного закона в стратификации атмосферы,

который не всегда выполняется, а если и выполняется, то только приближенно. Мы ставим задачу определения среднеинтегрального значения \bar{T} без каких-либо предположений о вертикальном строении температуры приземного слоя атмосферы, а полагаем только некоторое следование изотермических поверхностей за рельефом местности.

Сделаем вывод необходимых формул. Как известно, показатель преломления для волн светового диапазона определяется из выражения:

$$n = 1 + \frac{(n_{0,760} - 1) \cdot B \cdot T_0}{760 \cdot T} - \frac{55 \cdot e \cdot 10^{-9}}{T} T_0. \quad (3)$$

Принято считать, что ячейки Керра светодальномеров максимально пропускают длины волн $\lambda = 541$ мкм с показателем $n_{0,760} = 1,0003051$.

Кривизна световой кривой в вертикальной плоскости определяется по формуле

$$\frac{1}{R_{xz}} = - \frac{dn}{dz}. \quad (4)$$

Знак «минус» означает, что плотность воздуха падает с высотой. Дифференцируя (3) и подставляя в (4), получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{xz}} = & -0,0003051 \cdot \frac{273,16}{760} \left(\frac{1}{T} \frac{dB}{dz} - \frac{B}{T^2} \frac{dT}{dz} \right) - \\ & - 0,0000418 \cdot \frac{273,16}{760} \left(-\frac{1}{T} \frac{de}{dz} + \frac{e}{T^2} \frac{dT}{dz} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Полагая $\frac{dB}{dz} = 0$ и $\frac{de}{dz} = 0$, найдем на основании (5) кривизну световой кривой, вызываемую только изменением температуры с высотой

$$\frac{1}{R_{T,xz}} = 0,0003051 \cdot \frac{273,16}{760} \frac{B}{T^2} \frac{dT}{dz} - 0,000015024 \frac{e}{T^2} \frac{dT}{dz} \quad (6)$$

или

$$\frac{1}{R_{T,xz}} = \frac{dT}{dz} \left(0,0001096 \frac{B}{T^2} - 0,000015024 \cdot \frac{e}{T^2} \right). \quad (7)$$

Вторым членом в скобках правой части уравнения (7) можно пренебречь, допуская при этом ошибку не более 0,04%. Тогда

$$\frac{1}{R_{T,xz}} = + 10,96^{-5} \cdot \frac{B}{T^2} \cdot \frac{dT}{dz}. \quad (8)$$

С другой стороны, составляющая коэффициента вертикальной рефракции, обусловленная только изменением температуры с высотой, найдется по формуле

$$K_T = \frac{R_3}{R_{T,xz}}, \quad (9)$$

где R_3 — радиус Земли. Откуда

$$R_{T,xz} = \frac{R_3}{K_T}. \quad (10)$$

Так что
$$\frac{K_T}{R_3} = 10.96 \cdot 10^{-5} \frac{B dT}{T^2 dz}. \quad (11)$$

Решая (11) относительно $\frac{dT}{dz}$, имеем

$$\frac{dT}{dz} = \frac{k_T \cdot T^2}{B \cdot R_3 \cdot 10.96 \cdot 10^{-5}}. \quad (12)$$

В формуле (12) B и T — средние давление и температура в слое воздуха, который проходит световой луч.

Естественно, положить

$$B = \frac{B_1 + B_2}{2} \quad (13)$$

и

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (14)$$

Запишем формулу (12) в интегральном виде, задаваясь пределами изменения высоты, и, естественно, температуры, а также, заменяя отметки z на превышения h :

$$\int_{T_1}^{T_i} dT = \frac{k_T \cdot T^2}{10.96 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot R_3} \int_{h_1}^{h_i} dh. \quad (15)$$

После интегрирования имеем

$$T_i = T_1 + \frac{k_T \cdot T^2}{10.96 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot R_3} (h_i - h_1). \quad (16)$$

Уравнение (16) позволяет определить температуру в любой точке по вертикали в слое от h_1 до h_i .

Так как T_1 измеряется на высоте h_1 , то можно принять, что $h_1 = 0$. Тогда найдем окончательно

$$T_i = T_1 + \frac{k_T \cdot T^2}{10.96 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot R_3} \cdot h_i. \quad (17)$$

Определим K_T как функцию зенитных расстояний: пусть z_0 — теоретическое зенитное расстояние, определенное по отметкам приемопередатчика и отражателя; z — измеренное зенитное расстояние; δ — частная вертикальная рефракция по этому же направлению. Так что

$$z_0 = z + \delta. \quad (18)$$

Пренебрегая вертикальным градиентом влажности, представим δ как

$$\delta = \delta_b + \delta_T, \quad (19)$$

где δ_b — составляющая вертикальной рефракции, вызванная барическим вертикальным градиентом; δ_T — составляющая вертикальной рефракции, вызванная вертикальным температурным градиентом. Тогда

$$z_0 = z + \delta_b + \delta_T. \quad (20)$$

Однако δ_b может быть вычислено по формуле

$$\delta_b = 0,370 \cdot \frac{B}{T^2} \cdot s. \quad (21)$$

С учетом (21) формула (20) примет вид

$$z_0 = z + 0,370 \cdot \frac{B}{T^2} \cdot s + \delta_T. \quad (22)$$

Из (22) определим неизвестную частную рефракцию вызванную только температурным градиентом;

$$\delta_T = z_0 - z - 0,370 \cdot \frac{B}{T^2} \cdot s. \quad (23)$$

Определим радиус световой кривой $R_{T_{xz}}$, обусловленный только вертикальным градиентом температуры $-\frac{dT}{dh}$, как функцию δ_T :

$$\frac{s}{R_{T_{xz}}} = \frac{2\delta_T}{\rho''}, \quad (24)$$

где s — длина измеряемой линии, откуда

$$R_{T_{xz}} = \frac{s \cdot \rho''}{2\delta_T}. \quad (25)$$

Теперь на основании (9) и (25) величина k_T может быть определена, как функция δ_T . После несложных преобразований имеем

$$k_T = 61.7749 \frac{\delta_T}{s}. \quad (26)$$

Здесь δ_T — выражено в секундах, s — в метрах.

Определим теперь среднее интегральное значение температуры \bar{T} на пути луча.

$$\bar{T} = \frac{1}{s} \int_0^s T_i \cdot ds_i. \quad (27)$$

После подстановки в (27) значения T_i из (17) получим

$$\bar{T} = \frac{1}{s} \int_0^s \left(T_1 + \frac{k_T \cdot T^2}{10,96 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot R_3} \cdot h_i \right) ds_i. \quad (28)$$

В случае плавного рельефа, если положить, что линии равных температур следуют за рельефом местности, в формуле (28) для заданного направления с некоторым основанием можно считать h_i величиной постоянной и равной средней высоте луча над подстилающей поверхностью — h_{cp} или средней эквивалентной высоте $h_{cp, экв}$.

Формула (28) примет вид:

для случая h_{cp} .

$$\bar{T} = T_1 + \frac{k_T T^2}{10,96 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot R_3} \cdot h_{cp}, \quad (29)$$

для случая $h_{\text{ср. экв.}}$.

$$\bar{T} = T_1 + \frac{k_T \cdot T^2}{10,96 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot R_a} \cdot h_{\text{ср. экв.}} \quad (30)$$

Так как k_{T_1} и T_1 могут быть определены и у приемно-передатчика и у отражателя, то за окончательный результат примем их средние значения

$$k_T = \frac{k_{T_1} + k_{T_2}}{2} \quad \text{и} \quad T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Следовательно

$$\bar{T} = T_1 + \frac{k_T \cdot T^2}{10,96 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot R_a} \cdot h_{\text{ср}} \quad (31)$$

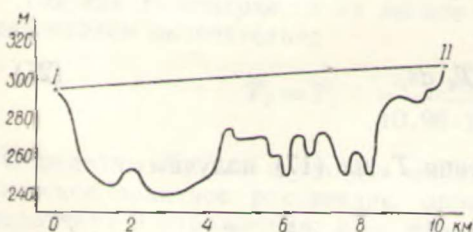
и

$$T = T_1 + \frac{k_T \cdot T^2}{10,96 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot R_a} \cdot h_{\text{ср. экв.}} \quad (32)$$

Таким образом, мы получили все необходимые формулы для определения среднеинтегрального значения температуры на пути светового луча и с некоторой достоверностью можем определить Δs_n — среднеинтегральную поправку в результаты светодальномерных измерений по метеоэлементам B , T и e .

Для экспериментального изучения вопросов влияния атмосферы на точность светодальномерных измерений во всхолмленной местности было решено вначале поставить продолжительные светодальномерные измерения на линии—эталоне с довольно сложным профилем (см. рис. 1), характерным для всхолмленного района. Колебание отметок вдоль профиля достигало 60 м при средней высоте луча над подстилающей поверхностью 37,6 м.

Эквивалентная высота луча с пункта I на пункт II составила 26,2 м, а с пункта II на пункт I — 24,5 м. Эта линия является одной из сторон учебного полигона геодезического факультета Львовского политехнического института. Длина линии 10,2 км, что соответствует



Профиль по линии I-II.

$h_{\text{ср}} = 37,6$ м, $h_{\text{экв. I-II}} = 26,2$ м, $h_{\text{экв. II-I}} = 24,5$ м.
Масштабы: вертикальный 1 : 1000, горизонтальный 1 : 50 000

средней длине сторон триангуляции II класса. Линия-эталон — замыкающая ломаного базиса (два излома).

Сложный профиль вдоль линии не позволил измерять ее проволоками непосредственно. Относительная ошибка измерения базиса (замыкающей) не ниже 1 : 800 000. Длина базиса была предварительно определена в июне—июле 1966 г. Светодальномерные измерения на эталоне

не ставились с 22 июля по 27 августа 1966 г. На пункте I был установлен на штативах светодальномер СВВ-1, а на пункте II — спаренный отражатель. На этих же пунктах примерно на высоте приемно-передатчика и отражателя были установлены теодолиты ОТ-02 и люкасы. Светодальномер и отражатель устанавливались над центрами знаков, остальные приборы — внецентренно. Отметки пунктов были получены из геометрического нивелирования III класса.

Основное содержание программы исследований таково:

1. Светодалномерные измерения ведутся по нечетным часам в ночное время суток.

2. В каждый нечетный час выполняется восемь приемов: четыре в прямом ходе на частотах f_1, f_2, f_3, f_4 и четыре — в обратном на частотах f_4, f_3, f_2, f_1 .

Схему изменения частоты генератора при выполнении отдельного приема можно представить так:

Прямой ход

- 1-я фиксация — от высшей частоты к низшей;
- 2-я фиксация — от низшей к высшей;
- 3-я фиксация — от низшей частоты к высшей;
- 4-я фиксация — от высшей частоты к низшей.

Обратный ход

- 1-я фиксация — от низшей частоты к высшей;
- 2-я фиксация — от высшей частоты к низшей;
- 3-я фиксация — от высшей частоты к низшей;
- 4-я фиксация — от низшей частоты к высшей.

Порядок изменения частот генератора, аналогичный принятому, предложен М. В. Ратынским (4).

3. Одновременно со светодалномерными измерениями производятся синхронные взаимные измерения зенитных расстояний, причем за время часовой светодалномерной программы выполняется два приема измерения зенитных расстояний. Измерения зенитных расстояний ведутся на люкасы или на прямой и отраженный свет приемопередатчика.

4. Метеоэлементы B, T, e измеряются как на пункте I , так и на пункте II в начале и конце приема светодалномерных измерений.

5. Ручным анемометром на пункте I измеряется скорость ветра. Облачность фиксируется по пятибальной системе: 0 — безоблачно; $1/4, 1/2, 3/4$ — покрытие видимого небосвода облаками соответственно на одну, две и три четверти; 1 — полное покрытие облаками;

6. После завершения экспериментальных работ по линии — эталону проводятся аналогичные исследования еще на нескольких линиях сети, имеющих отметки пунктов из геометрического нивелирования.

В табл. 1 приведены результаты светодалномерных измерений, полученные из часовых программ. Средняя величина средней квадратической ошибки измерения расстояния одним приемом, вычисленная по уклонениям приемов от среднего за одну ночь, оказалась равной ± 139 мм. При этом средняя квадратическая ошибка приема, полученная за одну ночь, вычислялась по формуле

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\sigma v]}{k(n-1)}}, \quad (33)$$

где k — число часовых программ, выполненных за ночь;

n — число приемов в часовой программе.

Точность часовой программы, вычисленная на основании табл. 1, равна ± 60 мм. Средняя квадратическая ошибка окончательного результата составляет ± 10 мм.

Точность измерения зенитных расстояний одним приемом, вычисленная по колебаниям места зенита за все время наблюдений, оказалась равной: на пункте I $m_z = \pm 4''{,}06$; на пункте II $m_z = \pm 3''{,}36$.

Так как каждая часовая программа светодальномерных измерений сопровождалась двумя приемами измерений зенитных расстояний, то ошибки измерения зенитных расстояний в часовых программах следует считать равными соответственно $\pm 2'',81$ и $\pm 2'',33$.

Таблица 1
 Результаты измерения эталонной линии
 светодальномером СВВ-1, полученные
 из часовых программ наблюдений

Дата (1966)	Время наблюдений	Приемная труба	Измеренное расстояние s_0 (м)	Поправки Δs_n (в мм)	Исправленные расстояния s (в м)
3/VIII	21	Л	10115,384	307	10115,691
	23	Л	10115,366	288	10115,654
4/VIII	01	Л	10115,428	278	10115,706
	03	Л	10115,465	269	10115,734
	21	Л	10115,344	352	10115,696
5/VIII	23	Л	10115,298	348	10115,646
	21	Л	10115,270	326	10115,596
	23	Л	10115,305	310	10115,615
6/VIII	01	Л	10115,370	288	10115,658
	03	Л	10115,492	288	10115,780
7/VIII	21	П	10115,388	284	10115,672
	23	П	10115,365	270	10115,635
8/VIII	01	П	10115,300	249	10115,549
	03	П	10115,555	242	10115,797
	21	П	10115,445	320	10115,765
9/VIII	23	П	10115,339	296	10115,635
	01	П	10115,374	280	10115,654
	03	П	10115,516	266	10115,782
10/VIII	21	П	10115,383	317	10115,700
	21	П	10115,397	252	10115,649
11/VIII	01	П	10115,458	240	10115,698
	03	П	10115,386	212	10115,598
	23	П	10115,371	287	10115,658
12/VIII	01	П	10115,447	276	10115,723
	03	П	10115,388	274	10115,662
	23	П	10115,400	287	10115,687
15/VIII	21	П	10115,384	294	10115,678
	23	П	10115,485	278	10115,763
16/VIII	01	П	10115,454	268	10115,722
	03	П	10115,477	259	10115,736
	05	П	10115,484	252	10115,736
	19	Л	10115,469	264	10115,733
	23	Л	10115,360	222	10115,582
17/VIII	01	Л	10115,498	214	10115,712
	03	Л	10115,447	208	10115,655
	05	Л	10115,553	208	10115,761

Рассмотрим вначале результаты исследований, полученные на базе. Так как обычно светодальномерные измерения на отдельной линии ведутся в течение одной или двух ночей, нами были вычислены средние значения длин базиса, как и поправок Δs_n за каждую ночь. Наблюдения длились 11 ночей. Из них 7 — малооблачных и 4 — с облачностью $\frac{3}{4}$ —1. Средняя скорость ветра порядка 1,5—2 м/сек.

В табл. 2 приведены средние за ночь значения длин — s , поправки Δs_n , вычисленные по измеренным метеоэлементам в двух конечных точках линии, средняя бальность облачности за ночь, а также значения давления B , температуры T и влажности e .

Сводная ведомость результатов наблюдений на линии-эталоне

Дата (1966)	Среднее s за ночь без погр.	Среднее s за ночь с поправ.	Метеоэлементы									$K_{T_{cp}}$	$\frac{dT}{dh}$	$\bar{T}_{cp, экв}$	T_{cp}	Облачность
			приемо- передатчики			отражатель			среднее							
			B_1	T_1	e_1	B_2	T_2	e_2	B	T	e					
3--4 VIII	10115,411	10115,696	735,9	290,70	17,71	735,1	290,41	16,74	735,5	290,55	17,22	+0,094	+0,015	290,91	291,09	0
4 VIII	10115,321	10115,671	730,5	295,34	22,12	729,6	294,76	20,52	730,1	295,05	21,32	+0,074	+0,013	295,36	295,52	3/4
5--6 VIII	10115,359	10115,662	734,1	291,91	18,00	733,3	291,81	18,66	733,8	291,86	18,33	+0,042	+0,007	292,03	292,11	3/4
7--8 VIII	10115,402	10115,663	736,3	288,34	13,64	734,4	287,98	14,10	735,4	288,16	13,87	+0,173	+0,028	288,83	289,17	1/4
8--9 VIII	10115,420	10115,709	734,0	290,31	14,51	732,8	290,51	16,06	733,4	290,41	15,28	+0,140	+0,023	290,96	291,26	0
9 VIII	10115,383	10115,700	733,2	292,46	16,50	731,2	292,26	18,15	732,2	292,36	17,32	+0,050	+0,008	292,55	292,65	1
10--11 VIII	10115,414	10115,649	739,2	287,16	13,95	737,8	286,29	13,78	738,5	286,73	13,86	+0,078	+0,012	287,02	287,18	1/4
11--12 VIII	10115,402	10115,681	739,0	291,26	15,80	737,6	290,53	16,45	738,3	290,89	16,12	+0,192	+0,032	291,65	292,06	0
12 VIII	10115,400	10115,687	741,7	292,86	18,15	739,5	292,56	20,55	740,6	292,71	19,35	+0,106	+0,018	293,14	293,38	1/2
15--16 VIII	10115,457	10115,727	740,0	290,62	16,50	738,4	290,36	17,42	739,2	290,49	16,96	+0,098	+0,016	290,87	291,09	1/2
16--17 VIII	10115,486	10115,689	743,8	287,78	12,98	742,8	287,73	14,90	743,3	287,75	13,94	-0,010	-0,002	287,70	287,68	1
Ср. 10115,685																

Сразу же обращает на себя внимание тот факт, что если размах колебаний измеренных значений s составляет 165 мм, то после введения поправок этот размах уменьшается более чем в два раза и составляет только 78 мм, что указывает на эффективность поправок.

Здесь же приведены величины $k_{T_{cp}}$ — составляющие коэффициента вертикальной рефракции, обусловленные только вертикальными градиентами температуры и непосредственно $\frac{dT}{dh} = \gamma$ в градусах на метр, определенные по зенитным расстояниям. Последние заслуживают внимания.

Прежде всего, во все ночи, кроме последней, имела место инверсия температуры. Нетрудно подсчитать, что точность определения $\frac{dT}{dh}$ по зенитным расстояниям очень высока: $m_T = \pm 0,001 - 0,002$ град/м. Величина градиентов находится в хорошей коррелятивной связи с облачностью. При малооблачной погоде максимальный рост температуры с высотой в слое прохождения луча достигал 3°,2 на 100 м при среднем 2°,4. Наоборот, при погоде со значительной облачностью (более $\frac{1}{2}$) максимальный рост температуры на 100 м составляет только 1°,3 С, при среднем 0°,65 С.

В двух последних графах таблицы приведены средние интегральные значения температуры \bar{T} на высоте луча. При этом, если полагать изотермические поверхности параллельными рельефу, то получим \bar{T}_{cp} (последняя графа); если же полагать, что углы наклона изотермических поверхностей меньше, чем углы наклона рельефа и что наклоны изотермических поверхностей находятся в некоторой зависимости с эквивалентными высотами, тогда соответственно получим $\bar{T}_{cp, экв}$ (предпоследняя графа).

Таблица 3
Разности средних и среднеинтегральных значений температур

Тип погоды	Средние превышения		Эквивал. средн. прев.	
	ΔT_{max}	ΔT_{cp}	ΔT_{max}	ΔT_{cp}
Малооблачно	+1,17	+0,76	+0,76	+0,49
Облачность более 1/2	+0,47	+0,24	+0,31	+0,16

Разности температур \bar{T} и T сведены в табл. 3. Разности температур носят систематический характер, что и понятно, так как почти все ночи наблюдалась инверсия.

Нам остается проанализировать поправки Δs_d , которые могут быть вычислены пятью различными методами:

- 1) по метеоэлементам, измеренным у прямо-передатчика; 2) по метеоэлементам, измеренным у отражателя; 3) по средним значениям метеоэлементов, измеренным у прямо-передатчика и отражателя; 4) по средним B , e и среднеинтегральным $\bar{T}_{cp, экв}$; 5) по средним B , e и среднеинтегральным \bar{T}_{cp} .

Результаты вычислений представлены в табл. 4. В этой же таблице приведены число приемов, выполненных за ночь, и ошибки попра-

вок $\Delta s_n - v_n$, полученные как разности между поправками, вычисленными пятым и всеми остальными методами.

Величины v_n и характеризуют ошибки от неточного учета метеозащитных элементов для случая всхолмленной местности. Как видим, эти ошибки носят явно выраженный систематический характер; в ночное время занижают длину линии и достигают 1 : 1 000 000. Конечно, для светодальномера СВВ-1 достаточно вести измерения метеозащитных элементов в двух, часто даже в одной точке, тем не менее при точных светодальномерных измерениях ЭОДом или геодезическим методом эти ошибки необходимо учитывать. По нашим исследованиям, в расстоянии, полученном из программы за одну-две ночи, эта ошибка может оказаться равной 25—30 мм при расстоянии 25—30 км.

Таблица 4

Значения поправок Δs_n и их ошибок v_n на линии-эталоны

Дата (1966)	Поправки Δs_n и ошибки v_n в мм вычислены методами										Число приемов с/д измерений
	1		2		3		4		5		
	Δs_n	v_n	Δs_n	v_n	Δs_n	v_n	Δs_n	v_n	Δs_n	v_n	
3—4/VIII	285	+ 5	285	+ 5	285	+ 5	289	+1	290	0	32
4/VIII	351	+ 4	348	+ 7	350	+ 5	353	+2	355	0	16
5—6/VIII	305	+ 2	306	+ 1	306	+ 1	306	+1	307	0	32
7—8/VIII	259	+11	262	+ 8	260	+10	267	+3	270	0	32
8—9/VIII	288	+11	293	+ 6	291	+ 8	296	+3	299	0	32
9/VIII	313	+ 6	318	+ 1	316	+ 3	318	+1	319	0	8
10—11/VIII	238	+ 4	235	+ 6	236	+ 5	240	+1	241	0	24
11—12/VIII	278	+10	277	+10	278	+10	285	+3	288	0	24
12/VIII	283	+11	290	+ 4	288	+ 6	292	+2	294	0	8
15—16/VIII	269	+ 7	272	+ 4	271	+ 5	274	+2	276	0	40
16—17 VIII	225	- 2	228	- 1	227	0	227	0	227	0	48

Рассмотрим теперь, как наши расчеты ошибок v_n согласуются с результатами линейных измерений. Длина базиса по измерениям проволоками — 10 115,341 м, по измерениям светодальномером (без учета постоянной) — 10 115,685 м. Постоянная поправка светодальномера, полученная ранее из обработки 420 приемов светодальномерных измерений, выполненных на другом базисе длиной 3,2 км, расположенном на равнине и измеренном проволоками с относительной ошибкой порядка 1 : 1 500 000, оказалась равной 349 мм [2].

Таким образом, длина базиса по измерениям светодальномером — 10 115,336 м, то есть действительно несколько занижена. Конечно, так как длина линии-эталоны по измерениям проволоками и по измерениям светодальномером известна с погрешностями того же порядка, что и обнаруженная разность, то приведенное здесь сопоставление нельзя считать абсолютно достоверным, однако, оно согласуется с нашими расчетами.

Интересны в этом отношении данные В. А. Колибаева [1]. Он выполнил сопоставление светодальномерных измерений с измерениями проволоками на 23 базисах общей длиной 262 км. Измерения велись ЭОДом или геодезическим методом и оказались суммарно заниженными на 54 мм, хотя условия этих измерений отличаются от наших, так как световой луч здесь шел незначительно ниже над подстилающей поверхностью. Правда, В. А. Колибаев объясняет это различие заниженной скоростью света в вакууме на 0,1 км/сек. Однако это различие

может быть объяснено и неточностью учета метеоэлементов. Таким образом, этими данными подтверждаются наши исследования.

Перейдем теперь к рассмотрению исследований атмосферных влияний на результаты светодальномерных измерений на других сторонах сети, где одновременно со светодальномерными измерениями велись измерения зенитных расстояний. Кроме базиса, такие измерения ставились еще на семи сторонах в течение 13 ночей. Результаты обработки приведены в табл. 5. Обозначения, принятые в таблице, объяснены ранее. Отметим, что на всех линиях средняя высота луча h_{cp}

Таблица 5
Значения поправок Δs_n , $\overline{\Delta s_n}$ и их ошибок v_n на линиях сети

Дата, время наблюдений (1966)	T_{cp}	$k_{T_{cp}}$	$\frac{dT}{dh}$	h_{cp}	T_{cp}	Δs_n	$\overline{\Delta s_n}$	v_n	Исправл. длина линии	$\frac{v_{ni\ cp}}{s_i}$
<i>Линия I—IX</i>										
19.VIII 21	294,5	0,078	0,013	57,2	295,2	328	336	+ 8		
23	292,2	0,222	0,037		294,3	306	325	+19		
20.VIII 22	292,6	0,018	0,003		292,8	325	327	+ 2		
21.VIII 02	290,0	0,036	0,006		290,3	298	301	+ 3		
								+ 8	10573,348	1300000
<i>Линия II—VIII</i>										
22.VIII 22	290,8	0,172	0,028	54,6	292,3	268	281	+13		
23.VIII 02	289,8	0,172	0,028		291,3	261	272	+11		
24.VIII 21	286,6	0,024	0,004		286,8	216	217	+ 1		
									9002,482	1100000
<i>Линия VIII—IX</i>										
3.IX 22	288,4	0,405	0,066	44,6	291,3	157	172	+15		
4.IX 02	288,2	0,041	0,007		288,5	158	160	+ 2		
5.IX 21	290,2	0,326	0,054		292,6	172	184	+12		
6.IX 23	284,6	0,448	0,071		287,8	130	148	+18		
								+12	5975,760	500000
<i>Линия V—VIII</i>										
7.IX 22	287,6	0,105	0,017	54,0	288,5	234	243	+ 9		
8.IX 02	287,6	0,129	0,021		288,7	237	247	+10		
8.IX 21	287,6	0,077	0,012		288,2	241	247	+ 6		
9.IX 20	284,9	0,194	0,031		286,6	212	227	+15		
								+10	9340,750	900000
<i>Линия VI—V</i>										
10.IX 21	285,6	0,138	0,022	55,0	286,8	257	270	+13		
11.IX 01	284,7	0,112	0,018		285,7	246	258	+12		
13.IX 22	389,0	0,148	0,024		290,3	286	300	+14		
16.IX 20	287,7	0,046	0,007		288,1	286	291	+ 5		
								+11	11767,716	1000000
<i>Линия VI—VII</i>										
17.IX 20	285,6	0,178	0,028	51,6	287,0	274	295	+21		
17.IX 23	282,7	0,188	0,029		284,2	240	259	+19		
								+20	13158,201	700000
<i>Линия IX—II</i>										
19.IX 23	281,5	0,155	0,024	58,8	282,9	161	177	+16		
20.IX 01	281,2	0,170	0,026		282,7	159	175	+16		
								+16	10580,573	700000

несколько больше, чем на линии-эталоны, а в отдельные ночи имела место более глубокая инверсия, что легко заметить по вертикальным градиентам температуры $-\frac{dT}{dh}$. Все линии оказались заниженными

в среднем на 12 мм. При средней длине линий 10,1 км это вызывает систематическую относительную ошибку порядка 1 : 1 000 000. На отдельных линиях измерения выполнялись при особо глубоких инверсиях и ошибки достигали 1 : 500 000—1 : 700 000.

Как видим, атмосферные влияния вносят ощутимые погрешности в результаты светодальномерных измерений во всхолмленных районах, которые необходимо принимать во внимание при высокоточных светодальномерных измерениях.

Электромагнитные волны, как известно, распространяются по некоторым пространственным кривым, основная кривизна которых расположена в вертикальной плоскости. Так как интересующая нас замыкающая всегда короче криволинейной траектории распространения волн, то искривление луча (рефракция) вносит определенную погрешность систематического характера.

Для определения поправок за рефракцию Δs воспользуемся формулой

$$\Delta s = -\frac{k^2}{24R_3^2} \cdot s^3, \quad (34)$$

где k — коэффициент рефракции.

Так как во время наших экспериментов велись измерения зенитных расстояний, то представляется возможность определить поправки за рефракцию Δs . Для этого были вычислены средние за ночь коэффициенты вертикальной рефракции k_1 и k_2 соответственно для пунктов I и II, после чего определены:

$$k_{cp} = \frac{k_1 + k_2}{2}. \quad (35)$$

Далее, на основании формулы (34) были вычислены поправки для нашей линии-эталона (10,2 км) и для линии длиной 25 км в предположении, что коэффициенты рефракции для этой длинной линии останутся такими же.

Результаты вычислений приведены в табл. 6. Как видно из таблицы, поправки Δs больше при ясной погоде, φ уменьшаются при пасмурной. Максимальная величина Δs при ясной погоде (для $s=25$ км) равна 2,25 мм; средняя — 1,64 мм. При пасмурной погоде $\Delta s_{max} = 1,12$ мм, средняя — 0,90 мм. На остальных линиях сети эти погрешности такого же порядка и при самой глубокой инверсии, которая нами здесь наблюдалась, не превышают 4—5 мм.

В заключение сделаем выводы, вытекающие из настоящих исследований.

1. При светодальномерных измерениях во всхолмленной местности, когда средняя высота луча над подстилающей поверхностью порядка 20—60 м, и при измерении метеозлементов в двух конечных точках линий на высоте 1,5—2 м от земли величина относительной ошибки, обусловленной неточным знанием рабочей скорости света, в значении длин линий, полученных из программ, выполненных за одну-две ночи, составляет 1 : 1 000 000 и может достигать 1 : 500 000. При этом ошибки носят явно выраженный систематический характер: длины сторон будут несколько заниженными. Это объясняется тем, что светодальномерные измерения ведутся ночью при инверсионном распределении

температуры. Ошибки будут большими в безоблачные тихие ночи, особенно на юге страны.

2. Эти погрешности могут быть в значительной степени учтены разработанным методом определения среднеинтегрального значения температуры воздуха на пути светового луча по измерениям зенитных расстояний, выполняемым одновременно со светодальномерными изме-

Таблица 6
Значения поправок за рефракцию

Дата (1966)	$K_{\text{ср}}$	мм при		Об- лач- ность
		$s=10 \text{ км}$	$s=25 \text{ км}$	
3—4.VIII	0,292	0,09	1,36	0
4.VIII	0,265	0,07	1,12	3/4
5—6.VIII	0,239	0,06	0,92	3/4
7—8.VIII	0,375	0,14	2,25	1/4
8—9.VIII	0,338	0,12	1,83	0
9.VIII	0,246	0,06	0,97	1
10—11.VIII	0,283	0,08	1,28	1/4
11—12.VIII	0,342	0,12	1,88	0
12.VIII	0,302	0,09	1,47	1/2
15—16.VIII	0,298	0,09	1,42	1/2
16—17.VIII	0,195	0,04	0,61	1

рениями. Такой учет следует признать необходимым при высокоточных светодальномерных измерениях, например, при желании получить по измеренным значениям длин эталонные значения горизонтальных углов, при измерении длинных базисов в целях космической триангуляции, при изучении горизонтальных движений земной коры и в других случаях. Учет этих погрешностей целесообразен и при измерении сторон полигонометрии и базисных сторон триангуляции 1 класса.

3. Для уменьшения атмосферных влияний на результаты светодальномерных измерений можно также рекомендовать: а) вести измерения в пасмурные нештилевые ночи; б) применять светодальномеры, позволяющие производить измерения как днем, так и ночью и тем самым компенсировать вредные атмосферные влияния.

Наиболее надежным способом определения среднеинтегрального значения показателя преломления на пути светового луча следует считать дисперсиометр. Конструирование такого прибора — давно назревшая задача.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колибаев В. А. Определение скорости света из светодальномерных измерений на контрольных базисах. Изв. вузов, «Геодезия и аэрофотосъемка», № 4, 1965.
2. Островский А. Л. Геодезические методы учета влияния атмосферы на результаты светодальномерных измерений. «Геодезия, картография, аэрофотосъемка», № 3, 1965. Изд-во Львов. ун-та.
3. Прилепин М. Т. Определение показателя преломления воздуха при измерении расстояний светодальномерами. «Геодезия и картография», № 3, 1957.
4. Ратынский М. В. Об измерении расстояний светодальномером СВВ-1. «Геодезия и картография», № 5, 1963.
5. Saastamoinen J. The effect of path curvature of light waves in the refractive index application to electronic distance measurement «Canad Surveyor», 13, № 2, 1962.