

Д. И. МАСЛИЧ, М. Ф. ЛИСЕВИЧ, А. А. ЛИСТОПАДСКИЙ

УЧЕТ ПОПРАВОК ЗА ОШИБКИ В МЕТЕОДАННЫХ ПРИ РАДИОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ НА ХОЛМИСТОЙ МЕСТНОСТИ

При радиодальномерных измерениях на холмистой местности, когда радиоволны проходят на высоте $h_{\text{ср}}$, отличной от высоты h , на которой определяются метеоданные, измеренные значения длин линий будут содержать в себе ошибки за различие метеоусловий на этих высотах. Основное влияние на точность измерения длин линий будут оказывать ошибки в температуре и влажности [3, 11], поэтому их исследование в связи с широким внедрением радиодальномерных измерений в производство приобретает немаловажное значение.

Из метеорологии известно, что распределение температуры и водяного пара в атмосфере в значительной мере зависит как от лучистого теплообмена, так и от турбулентного переноса тепла [4, 7].

Так, распределение влажности по высоте обычно описывается зависимостью [2, 7]

$$q = q_0 e^{-\beta h}, \quad (1)$$

где q_0 — удельная влажность на начальном уровне; q — удельная влажность на уровне h ; β — некоторый коэффициент.

Д. Л. Лайхтман [4] выражает этот коэффициент так:

$$\beta = \frac{c}{\sqrt{k}}, \quad (2)$$

где c — некоторая постоянная для данного слоя воздуха, а k — коэффициент турбулентности воздуха, то есть величина β зависит не только от вертикального распределения температуры, но и от турбулентного обмена.

Значение коэффициента k в течение суток может изменяться много раз [7], следовательно и значение величины β будет изменяться с течением времени. Таким образом, в зависимости от того, в какое время выполняются радиоизмерения, распределение влажности по высоте будет различным по величине. В связи с этим для вычисления поправки в измеренную длину линии за различие влажностей на высотах $h_{\text{ср}}$ и h' необходимо учитывать турбулентное состояние атмосферы на момент измерений.

Определение коэффициента турбулентности k — довольно сложная задача [4], поэтому нам представляется целесообразным использовать часто применяемый для характеристики термодинамического состояния атмосферы показатель устойчивости $\frac{\Delta t'}{v^2}$ [1], где $\Delta t'$ — разность температур на двух уровнях в приземном слое, а v — средняя скорость ветра на верхнем уровне. В зависимости от величины параметра $\frac{\Delta t'}{v^2}$ П. А. Во-

риновым [1] было выделено четыре группы термодинамического состояния атмосферы. Закономерности распределения температуры и влажности в нижнем 500-метровом слое им предложено описывать степенным законом

$$A_h = A_0 + b \cdot h^n, \quad (3)$$

где A_0 — значение метеоэлемента на начальном уровне; A_h — значение метеоэлемента на уровне h ; b и n — коэффициенты, которые определяются эмпирически для каждой группы термодинамического состояния атмосферы.

Используя указанный принцип классификации термодинамического состояния атмосферы и зависимость (3) для распределения метеоданных по высоте, мы проанализировали результаты выполненных нами радиодальномерных измерений в холмистом районе Вольно-Подольской возвышенности.

С 1 по 21 июня 1973 г. радиодальномером РДГВ были выполнены экспериментальные круглосуточные измерения длин линий, характеристика которых представлена в табл. 1. Схема расположения измеряемых линий показана на рисунке.

Таблица 1

Характеристика экспериментальных измерений, выполненных 1—21. VII 1973 г. на холмистой местности

Измеряемая линия	Длина линии, км	Высота станций над землей, м		Количество		
		h_1	h_2	серий	приемов	уток
Базис 1—2	1,5	3	1,5	13	59	1
" "	1,5	3	21	8	46	1
Базис 1—3	3,6	3	21	8	41	1
Сторона триангуляции 4—5	5,0	1,5	1,5	24	123	3
То же	5,0	1,5	23	7	40	1
" "	5,0	21	23	8	37	1
Сторона триангуляции 5—6	15,7	21	23	7	32	1
То же	15,7	1,5	1,5	7	29	1
Всего				82	407	10

Измерения в течение суток выполнялись сериями через 2—3 час. Каждая серия состояла из 4—6 приемов, выполненных на 12 несущих частотах один за другим в течение 30—40 мин. Метеоданные в начале и конце каждого приема определялись на уровне установки станций.

Кроме того, дополнительно к этим измерениям в начале и конце каждой серии в одной из точек измеряемой линии (см. рисунок) определялись температура, влажность и скорость ветра на уровнях 1,5, 7,2 и 22,5 м. Для этого на площадках сигналов, расположенных на указанных высотах, были укреплены по два психрометра Ассмана и по одному чашечному анемометру. Давление измерялось anerоидом на уровне установки станций, а для каждой из указанных выше высот оно было определено с использованием барометрической ступени.

Измерения были выполнены в ясную, переменную и облачную погоду, преимущественно без осадков, при температуре воздуха 8—23° С, влажности воздуха 6—19 мм рт. ст. и давлении 728—744 мм рт. ст.

Значения измеренных длин линий для каждого приема были вычислены по формуле

$$D_{\text{изм}} = \frac{c\tau}{2(1 + N \cdot 10^{-6})}, \quad (4)$$

где c — скорость распространения радиоволн в вакууме, равная 299792,5 км/сек; $\frac{\tau}{2}$ — измеренное время прохождения радиоволн вдоль измеряемой линии; N — показатель преломления радиоволн в N -единицах, вычисляемый по формуле Эссена и Фрума [2].

$$N = \frac{103,49}{T} (P - e) + \frac{86,26}{T} \left(1 + \frac{5748}{T} \right) e, \quad (5)$$

где e , T и P — средние значения влажности в мм рт. ст. абсолютной температуры в °К, давления в мм рт. ст., вычисленные по значениям метеоданных, определенных на уровнях установки станций.

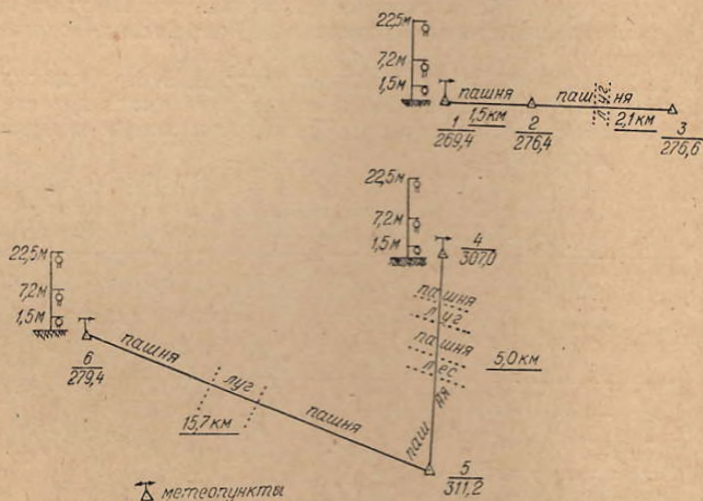


Схема расположения линий, измеряемых радиодальномером РДГВ 1—21. VI 1973 г.

Для каждой серии измерений вычислены средние значения длин линий

$$D' = \frac{[D_{\text{изм}}]}{n}, \quad (6)$$

где n — количество приемов в каждой серии.

При этом отметим, что внутренняя сходимость результатов измерений в каждой серии достаточно высокая. Для линии длиной 5 км она составляет в среднем величину 1 : 200 000—1 : 400 000, а для линии длиной 15,7 км — величину 1 : 400 000—1 : 700 000. В то же время амплитуда колебаний средних значений длин линий в сериях $\Delta v_1 = (D'_{\text{макс}} - D'_{\text{мин}})$ в течение суток достигает значительных величин. Например, для линий 4—5 при измерении сигналов со столиков $\Delta v_1 = 45$ мм, а при измерении со штативов эта величина достигала 88 мм, что составляет 1 : 56 000 длины измеряемой линии.

Для анализа выполненных измерений и введения поправок в измеренные значения длин линий все серии наблюдений были сведены в термодинамические группы по величине показателя устойчивости $\frac{\Delta t'}{v^2}$.

Применительно к радиодальномерным измерениям за величину $\Delta t'$ удобно принять разность температур на высоте 6—8 м и на высоте уста-

шка прибора на штатив, то есть 1,5 м. В производственных условиях для определения этой разности можно использовать дистанционные термометры или термопары, один из датчиков которых помещается на уровне 1,5 м, а другой выносится в атмосферу на уровень 6—7 м [5]. Для определения величины v^2 можно использовать чашечный анемометр, поднятый на мачте такой же высоты, включаемый и выключаемый с земли с помощью шнура.

В наших исследованиях за величину $\Delta t'$ принималась разность температур на уровнях 7,2 и 1,5 м, определяемых по показаниям двух пар психрометров, подвешенных на площадках сигнала на этих высотах, а за величину v — скорость ветра, измеренная анемометром на высоте 7,2 м.

Условия наблюдений, при которых были выполнены радиодальномерные измерения, подобно П. А. Воронцову [1], были разбиты нами на четыре группы:

- I — при величине $\frac{\Delta t'}{v^2}$, меньшей $-0,061$;
- II — при величине $\frac{\Delta t'}{v^3}$ от $-0,060$ до $-0,021$;
- III — при величине $\frac{\Delta t'}{v^2}$ от $-0,020$ до $+0,021$;
- IV — при величине $\frac{\Delta t^2}{v^2}$, превышающей $+0,021$.

Формулу (3) запишем отдельно для температуры и влажности

$$\left. \begin{aligned} t_h - t_0 &= b_1 (h')^{n_1} \\ e_h - e_0 &= b_2 (h')^{n_2} \end{aligned} \right\}.$$

Здесь t_h и e_h — температура и влажность на высоте h ; t_0 и e_0 — температура и влажность на начальной высоте h_0 (1,5 м); $h' = h - h_0$; n_1 , b_1 , n_2 и b_2 — эмпирические коэффициенты. Для вычисления последних были использованы результаты градиентных измерений, выполненных нами за весь период наблюдений на высотах 1,5, 7,2 и 22,5 м. Всего было проведено 102 серии определений метеоданных на этих высотах, что позволило для каждой термодинамической группы получить около 25 уравнений вида (7) для высоты 22,5 м и 25 уравнений для высоты 7,2 м:

$$\begin{aligned} t_{22,5} - t_0 &= b_1 \cdot 21,0^{n_1}; & t_{7,2} - t_0 &= b_1 \cdot 5,7^{n_1}; \\ e_{22,5} - e_0 &= b_2 \cdot 21,0^{n_2}; & e_{7,2} - e_0 &= b_2 \cdot 5,7^{n_2}. \end{aligned}$$

Осреднив результаты $t_{22,5} - t_0$, $e_{22,5} - e_0$, $t_{7,2} - t_0$, $e_{7,2} - e_0$ для каждой термодинамической группы, мы получили следующие уравнения:

I термодинамическая группа	II термодинамическая группа
$-0,60 = b_1 \cdot 5,7^{n_1}$;	$-0,62 = b_1 \cdot 5,7^{n_1}$;
$-1,08 = b_1 \cdot 21,0^{n_1}$;	$-1,00 = b_1 \cdot 21,0^{n_1}$;
$-0,54 = b_2 \cdot 5,7^{n_2}$;	$-0,42 = b_2 \cdot 5,7^{n_2}$;
$-1,14 = b_2 \cdot 21,0^{n_2}$.	$-0,70 = b_2 \cdot 21,0^{n_2}$.

III термодинамическая группа

$$\begin{aligned} -0,09 &= b_1 \cdot 5,7^{n_1}; \\ -0,18 &= b_1 \cdot 21,0^{n_1}; \\ -0,09 &= b_2 \cdot 5,7^{n_2}; \\ -0,20 &= b_2 \cdot 21,0^{n_2}; \end{aligned}$$

IV термодинамическая группа

$$\begin{aligned} +0,69 &= b_1 \cdot 5,7^{n_1}; \\ +1,22 &= b_1 \cdot 21,0^{n_1}; \\ -0,31 &= b_2 \cdot 5,7^{n_2}; \\ -0,62 &= b_2 \cdot 21,0^{n_2}. \end{aligned}$$

Значения n_1 , b_1 , n_2 и b_2 для каждой термодинамической группы вычислены из данных уравнений:

	I	II	III	IV
n_1	0,45	0,37	0,53	0,44
b_1	-0,274	-0,325	-0,036	0,319
n_2	0,57	0,39	0,61	0,53
b_2	-0,200	-0,213	-0,031	-0,123

Для оценки полученных коэффициентов вычислены отклонения фактических значений температуры v_t и влажности v_e от вычисленных по формуле (7) и их среднеквадратические величины

$$m_t = \sqrt{\frac{[v_t^2]}{n-1}}, \quad m_e = \sqrt{\frac{[v_e^2]}{n-1}}. \quad (8)$$

Из 200 определений температуры и влажности лишь в 13 случаях значения v_t превышали $0^\circ,4$ и лишь в 10 случаях значения v_e превышали $0,3$ мм рт. ст. Значения m_t и m_e соответственно равны $\pm 0,24^\circ \text{C}$ и $\pm 0,15$ мм рт. ст.

Учитывая, что точность измерения температуры примерно равна $0^\circ,3-0^\circ,5$, а точность определения влажности — $0,3-0,5$ мм рт. ст. и v_t и v_e колеблются в этих же пределах, можем считать, что значения метеоданных, вычисленных с помощью зависимости (7) и коэффициентов, полученных эмпирическим путем из результатов 200 определений метеоданных, достаточно хорошо представляют действительные условия.

Используя полученные значения n_1 , b_1 , n_2 и b_2 для каждой серии измерений, вычислили разности температуры и влажности на средней высоте прохождения радиоволн и на высоте метеоизмерений. Для этого формулы (7) были приведены к логарифмическому виду

$$\begin{aligned} \lg(t_h - t_0) &= \lg b_1 + n_1 \lg h'; \\ \lg(e_h - e_0) &= \lg b_2 + n_2 \lg h' \end{aligned} \quad (9)$$

и за значение $\lg h'$ принято среднеинтегральное значение

$$(\lg h')_{\text{cp}} = \frac{1}{D} \int_0^D (\lg h')_* dD, \quad (10)$$

где $(\lg h')_*$ — значение $\lg h'$ в текущей точке линии D . Значения h'_{cp} вычислены с использованием имеющегося профиля линий и приведены в табл. 2.

В случае, когда ведущая и ведомая станции расположены на штативах, поправки в измеренные значения температуры Δt и влажности Δe будут равны

$$\Delta t = t_{h_{\text{cp}}} - t_0; \quad \Delta e = e_{h_{\text{cp}}} - e_0. \quad (11)$$

Результаты радиодальномерных измерений и введение поправок в длины линий
4—5 и 5—6

№ серии	Дата	Время	Тер- мо- дина- миче- ская груп- па	К-во приемов	D' , м	$V_1 =$ $-D'_{\text{ср}}$ $-D'$, мм	По- прав- ка ΔD , мм	$D_{\text{испр}} = D' +$ $+\Delta D$, м	$V_2 =$ $-D_{\text{испр. ср}}$ $-D_{\text{испр}}$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

а) Линия 4—5; $D=5,0$ км; $h_1=h_2=1,5$ м; $h_{\text{ср}}=45$ м

1	8.06	5	III	6	4958,998	+25	+7	4959,005	+11
2		8	III	6	4959,009	+36	+7	016	+22
3		11	I	6	4958,948	-25	+39	4958,987	-7
4		14	II	4	970	-3	+18	988	-6
5		17	II	6	971	-2	+18	989	-5
6		20	II	6	977	+4	+18	995	+1
7		23	IV	6	948	-25	+38	986	-8
8	9.06	2	IV	4	940	-33	+38	978	-16
9		5	III	5	989	+16	+7	996	+2
10		8	III	6	4959,019	+46	+7	4959,026	+32
11		11	I	4	4958,949	-24	+39	4958,988	-6
12		14	III	3	4959,008	+35	+7	4959,015	+21
13		17	II	4	4958,967	-6	+18	4958,985	-9
14		20	II	3	969	-4	+18	987	-7
15	10.06	1	IV	6	931	-42	+38	969	-25
16		5	III	5	4959,000	+27	+7	4959,007	+13
17		8	III	6	4958,997	+24	+7	004	+10
18	14.06	11	I	6	954	-19	+39	4958,993	-1
19		14	II	6	980	+7	+18	998	+4
20		17	II	6	965	-8	+18	983	-11
21		20	II	6	972	-1	+18	990	-4
22		23	IV	4	954	-19	+38	992	-2
23	15.06	3	IV	4	938	-35	+38	976	-18
24		8	III	5	4959,002	+29	+7	4959,009	+15

$D'_{\text{ср}}=4958,973$; $D_{\text{испр. ср}}=4958,994$;

$\Delta v_1=88$ мм; $\Delta v_2=57$ мм; $m_1=25,1$ мм; $m_2=13,5$ мм;

б) Линия 4—5; $D=5,0$ км; $h_1=1,5$ м; $h_2=23$ м; $h_{\text{ср}}=59$ м

1	11.06	9	III	6	4959,018	+7	+7	4959,025	-2
2		13	II	6	011	0	+14	025	-2
3		16	III	6	021	+10	+7	028	+1
4		19	II	6	009	-2	+14	023	-4
5		22	IV	6	4958,997	-14	+31	028	+1
6	12.06	1	V	5	4959,001	-10	+31	032	+5
7		5	III	5	019	+8	+7	026	-1

$D'_{\text{ср}}=4959,011$; $D_{\text{испр. ср}}=4959,027$;

$D'_{\text{ср}}=4959,011$; $D_{\text{испр. ср}}=4959,027$;

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
в) Линия 4-5; $D=5,0$ км; $h_1=27$ м; $h_2=23$ м; $h_{cp}=75$ м									
32	13.06	9	II	6	4959,083	+11	+ 8	4959,091	+ 5
33		12	II	4	086	+14	+ 8	094	+ 8
34		15	III	4	092	+20	+ 5	097	+11
35		18	III	5	092	+20	+ 5	097	+11
36		21	IV	5	059	-13	+22	081	- 5
37	14.06	0	IV	4	071	- 1	+22	093	+ 7
38		2	IV	5	047	-25	+22	069	-17
39		5	IV	4	047	-25	+22	069	-17

$D'_{cp}=4959,072$; $D_{непр.ср}=4959,086$;
 $\Delta v_1=45$ мм; $\Delta v_2=28$ мм; $m_1=19,0$ мм; $m_2=11,8$ мм;

г) Линия 5-6; $D=15,7$ км; $h_1=h_2=1,5$ м; $h_{cp}=50$ м

40	16.06	19	III	5	15707,686	+52	+22	15707,708	+11
41		22	III	5	655	+21	+22	679	-18
42	17.06	11	I	4	599	-35	+131	730	+33
43		14	II	2	643	+ 9	+58	701	+ 4
44		17	II	5	630	- 4	+58	688	- 9
45		21	III	4	662	+28	+22	684	-13
46	18.06	1	IV	4	561	-73	+126	687	-10

$D'_{cp}=15\,707,634$; $D_{непр.ср}=15\,707,697$;
 $\Delta v_1=125$ мм; $\Delta v_2=51$ мм; $m_1=41,4$ мм; $m_2=17,8$ мм.

Если одна или обе станции расположены на століках сигналов, учитывая, что метеоданные определены на уровнях установки станций h_1 и h_2 , поправки Δt и Δe вычисляются следующим образом:

$$\Delta t = (t_{h_{cp}} - t_0) - \frac{(t_{h_1} - t_0) + (t_{h_2} - t_0)}{2};$$

$$\Delta e = (e_{h_{cp}} - e_0) - \frac{(e_{h_1} - e_0) + (e_{h_2} - e_0)}{2}, \quad (12)$$

где

$$t_{h_1} - t_0 = b_1 (h_1')^{n_1}; \quad t_{h_2} - t_0 = b_1 (h_2')^{n_1};$$

$$e_{h_1} - e_0 = b_2 (h_1')^{n_2}; \quad e_{h_2} - e_0 = b_2 (h_2')^{n_2}. \quad (13)$$

Поправки в показатель преломления радиоволн N равны

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial N}{\partial e} \Delta e, \quad (14)$$

где $\frac{\partial N}{\partial t}$ и $\frac{\partial N}{\partial e}$ — частные производные функции (5), по которой определяется показатель преломления радиоволн, при температуре t и влажности e .

Поправки в значения D' вычислены следующим образом:

$$\Delta D = -\Delta N \cdot D'. \quad (15)$$

Исправленные значения $D_{\text{испр}}$ для каждой серии

$$D_{\text{испр}} = D' + \Delta D \quad (16)$$

приведены в табл. 2.

В результате исправлений измеренных длин линий поправками амплитуды колебаний полученных значений $\Delta v_2 = (D_{\text{испр}})_{\text{max}} - (D_{\text{испр}})_{\text{min}}$ в течение суток уменьшились примерно вдвое по сравнению с амплитудами колебаний значений длин линий до исправления Δv_1 . Сходимость результатов измерений между сериями на протяжении суток во всех случаях улучшилась, и соответственно уменьшились величины среднеквадратических отклонений

$$m_2 = \sqrt{\frac{v_2 v_2}{n-1}}, \quad (17)$$

по сравнению с

$$m_1 = \sqrt{\frac{v_1 v_1}{n-1}}, \quad (18)$$

где v_2 и v_1 — отклонения значений длин линий в каждой серии от среднего значения из n серий после исправления и до исправления поправками соответственно (табл. 2).

Заметим, что при данных условиях все поправки имеют положительный знак, что вполне объяснимо. По результатам ночных серий измерений профилей температуры и влажности в данной местности выходит, что на протяжении всех ночей было нормальное распределение влажности и инверсионное — температуры. Это привело к тому, что в ночной период значения длин линий получены заниженными, то есть поправки должны быть положительными.

Колебания значений длин линий в течение суток после исправления поправками, конечно, в некоторой степени остались, так как на их величину, кроме ошибок представленных метеоданных, влияют другие ошибки, в частности случайные ошибки определения показателя преломления N и времени распространения t .

Отметим, что значения n_1 , b_1 , n_2 и b_2 могут значительно отличаться не только по величине, но и по знаку, в зависимости от физико-географических условий. Об этом свидетельствует тот факт, что в слое 0—25 м в данной местности отсутствовала инверсия, а в других физико-географических районах, по нашим наблюдениям и по результатам других исследований [6, 8, 9, 10], инверсия влажности имеет место. В то же время эти коэффициенты обладают некоторой постоянностью для небольших промежутков времени в одной и той же местности, о чем свидетельствуют выводы, сделанные в работе [1], и в какой-то мере результаты наших исследований. Поэтому для производственных целей коэффициенты необходимо периодически определять для той местности, в которой производятся радиодальномерные измерения. Для этого можно использовать градиентные измерения расположенных вблизи метеостанций или же выполнять специальные градиентные измерения на имеющихся в данной местности сигналах или вышках высотой 20—30 м. Полученные таким образом коэффициенты n_1 , b_1 , n_2 и b_2 будут наиболее соответствовать физико-географическим условиям, в которых выполняются радионизмерения.

Итак, для уменьшения ошибок радиодальномерных измерений, в значения метеоданных, определенных на уровне станций, предлагается вводить поправки по формулам (9)—(13). Для вычисления поправок, в зависимости от термодинамической группы условий наблюдений, следует использовать различные коэффициенты — n_1 , b_1 , n_2 и b_2 , которые

необходимо находить эмпирически для данных физико-географических условий через определенные промежутки времени.

В заключение можно сделать следующие выводы.

При радиодальномерных измерениях в холмистой местности ошибки в измеренном расстоянии за разность метеоусловий на высоте прохождения луча $h_{\text{ср}}$ и на высоте установки станций h могут иметь различную величину, в зависимости от термодинамического состояния атмосферы в момент измерений. Эти ошибки значительно снижают точность измерений.

При учете поправок в радиодальномере измерения за метеоусловия необходимо учитывать степень устойчивости атмосферы в приземном слое, выделяя при этом по крайней мере четыре группы термодинамического состояния воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронцов П. А. Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. Л., 1960.
2. Иордан В., Эггерт О., Кнейсель М. Руководство по геодезии, т. 6. М., 1971.
3. Кравцов Н. И. Об изменении показателя преломления при радиогеодезических измерениях в зимний период. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1970, вып. 12.
4. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л., 1970.
5. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика, ч. 1. М., 1965.
6. Островский А. Л. Исследование влияния атмосферы на точность радиодальномерных измерений на всхолмленной местности. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1969, вып. 10.
7. Селезнева Е. С. Распределение температуры и влажности в дни с кучевой облачностью. — «Тр. ГГО», 1948, вып. 13.
8. Тр. ГГО, 1959, вып. 107.
9. Тр. ГГО, 1962, вып. 135.
10. Тр. ГГО, 1963, вып. 144/40.
11. Poder K. Atmospheric Correction to Tellurometer Measurements. Proceeding of the International Symposium Figure of the Earth and Refraction, Vienna. March 14th—17th, 1967.

Работа поступила 15 февраля 1974 года.
Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.