

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ РАДИОВОЛН НАД ВОДОЕМОМ

В метеорологической литературе приведены формулы для расчета норм испарения влаги с поверхности водохранилищ, выражающие закономерности изменения температуры и влажности при продвижении воздушной массы над водоемом. Эти формулы получены по осредненным значениям метеоданных из многолетних наблюдений на различных водоемах нашей страны [1,4—7].

Значения температуры и влажности на некотором удалении от берега авторы указанных работ определяют из соотношений:

$$t_D = t_1 + (t_0 - t') F_1; \quad (1) \quad e_D = e' + (e_0 - e') F_2, \quad (2)$$

Здесь t_D и e_D — температура и влажность воздуха на некоторой фиксированной высоте над водоемом на расстоянии D от

берега; t' и e' — соответственно температура и влажность воздуха на этой же высоте над сушей, прилегающей к водоему; t_0 — температура поверхности воды; e_0 — максимальная упругость водяного пара, определяемая по температуре t_0 ; F_1 и F_2 — некоторые функции, характеризующие режим тепло- и влагообмена над водоемом.

При поиске путей ослабления влияния погрешностей представительства показателя преломления воздуха на радиодальномерные измерения над водой мы применили формулы (1) и (2) для вычисления среднеинтегральных значений температуры и влажности воздуха над водоемом по измеренным на берегу метеозлементам.

Функции F_1 и F_2 разные авторы определяют по-разному [1, 6, 7]. В своих исследованиях для вычисления F_1 и F_2 мы используем формулы М. П. Тимофеева, которые наиболее часто применяются в современной метеорологической литературе [4, 5].

На основании теоретического анализа М. П. Тимофеев пришел к выводу [6], что на высоте h

$$F_1 = (1 - 1.33/D^m) 1/h^k; \quad (3) \quad F_2 = (1 - 1.50/D^m) 1/h^k. \quad (4)$$

Здесь m — показатель степени, зависящий от стратификации воздуха над водоемом, а именно: $m=1/7$ при инверсионных условиях, $m=1/10$ при равновесных условиях и $m=1/13$ при сверхадиабатических условиях. Для величин k в работе [6] приняты значения $k=0,20$ при инверсионных условиях и $k=0,09$ при сверхадиабатических условиях. Значение k для равновесных условий в упоминаемых источниках не приводится. В своих вычислениях для равновесных условий мы приняли $k=0,14$, т. е. среднее из значений для инверсионных и сверхадиабатических условий.

Для обработки метеорологических определений, выполненных на Каховском водохранилище 19—23 августа 1974 г., применяли формулы (1)—(4). Эксперимент описан в работе [2].

При практическом применении формул (3) и (4) возникает некоторая трудность в определении стратификации воздуха над водоемом. Условия стратификации получают по разности температур воды t_0 и воздуха t_b над водоемом на высоте 2...3 м. Известно, что для инверсионных условий $t_0 - t_b < 0$, для равновесных $t_0 - t_b = 0$ и для сверхадиабатических $t_0 - t_b > 0$.

В течение пяти суток нами были зарегистрированы только положительные разности $t_0 - t_b$. Равенство температур воды и воздуха наблюдалось только однажды, т. е. чисто случайно. Но из этого не следует, что за весь период наблюдений атмосфера не находилась в равновесном состоянии. Равновесные условия были зафиксированы при переходе от инверсионного состояния атмосферы к сверхадиабатическому и наоборот; но условие $t_0 - t_b$ реализовалось с некоторой степенью точности. Отклонения регистрируемых разностей $t_0 - t_b$ от нуля в ту или

иную сторону обусловлены погрешностями определения температуры поверхности воды и воздуха над водоемом.

При установлении интервала допустимых отклонений разностей $t_0 - t_B$ от нуля, для которого условия стратификации атмосферы можно считать равновесным, руководствовались следующими соображениями.

Измерения температуры воздуха t_B и температуры поверхности воды t_0 выполняют у берега; они сопровождаются как погрешностями собственно измерения, так и погрешностями представительства.

Значение погрешностей собственно измерения температуры воздуха зависит от условий измерений и может колебаться в пределах $0,2 \dots 0,7^\circ \text{C}$ [3]; в среднем эту величину можно принять равной $0,4^\circ \text{C}$.

По данным литературных источников [1, 6, 7], различия температуры воздуха на уровне $2 \dots 3$ м у берега и на середине водоема редко превышают $2 \dots 3^\circ \text{C}$. Результаты метеорологических определений, выполненных нами, свидетельствуют, что данные различия не превышали 2°C . Поэтому среднее значение температуры над водохранилищем при измерении на берегах выполняли с погрешностью представительства приблизительно 1°C . Общую погрешность средней температуры воздуха над водоемом подсчитывали как $m_{t_B} = \sqrt{0,4^2 + 1,0^2} = 1,1^\circ \text{C}$.

Погрешность собственно измерения температуры поверхности воды равна примерно $0,3^\circ \text{C}$. Что же касается погрешностей представительства температуры поверхности воды, то в работе [7] сделан вывод, что, измеряя температуру поверхности воды у одного берега, нельзя судить о температуре поверхности воды в открытой части водоема вследствие сгона теплых вод у одного берега и холодных у противоположного. Анализ результатов метеорологических определений на Кременчугском и Каховском водохранилищах свидетельствует, что средняя температура поверхности воды по измерениям на берегу определяется с погрешностью представительства приблизительно 1°C .

Общую погрешность определения температуры поверхности воды можно подсчитать как $m_{t_0} = \sqrt{0,3^2 + 1,0^2} = 1,0^\circ \text{C}$.

Тогда погрешность определения $t_0 - t_B$

$$m_{t_0 - t_B} = \sqrt{m_{t_0}^2 + m_{t_B}^2} = \sqrt{1,0^2 + 1,1^2} = 1,5^\circ \text{C}.$$

Учитывая рассчитанную погрешность, получаем стратификацию воздуха над водоемом:

инверсионные условия при $t_0 - t_B \leq -1,5^\circ \text{C}$;

равновесные условия при $t_0 - t_B < |1,5^\circ \text{C}|$;

сверхадиабатические условия при $t_0 - t_B \geq 1,5^\circ \text{C}$.

По формулам (1) — (4) вычисляли температуру и влажность воздуха на высоте 3 м над водой в точке K_3 на удалении 7 км от берега и сравнивали их с непосредственно измеренными

Сравнение температуры и влажности воздуха на удалении 7 км от берега, вычисленных по формулам и непосредственно измеренных

Дата	Время	$t_{\text{выч}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{изм}}, ^\circ\text{C}$	$v_t = t_{\text{выч}} - t_{\text{изм}}$	$e_{\text{выч}},$ мм рт. ст.	$e_{\text{изм}},$ мм рт. ст.	$v_e = e_{\text{выч}} - e_{\text{изм}}$ мм рт. ст.
19 августа	20	25,6	27,0	-1,4	17,1	18,7	-1,6
	21	24,7	25,1	-0,4	16,8	17,3	-0,5
	23	23,5	24,5	-1,0	16,8	17,6	-0,8
20 августа	0	22,6	24,3	-1,7	16,4	16,3	+0,1
	1	21,7	24,2	-2,5	15,3	14,6	+0,7
	3	21,2	22,8	-1,6	15,9	15,1	+0,8
	6	21,1	22,0	-0,9	16,3	15,5	+0,8
	8	22,4	23,0	-0,6	17,7	16,2	+1,5
	9	23,5	24,3	-0,8	18,0	18,8	-0,8
	12	28,4	29,4	-1,0	20,8	25,1	-4,3
	15	28,7	30,0	-1,3	19,4	24,4	-5,0
	16	28,3	30,2	-1,9	18,5	21,1	-2,6
	18	26,4	26,0	+0,4	16,8	17,7	-0,9
	21	22,8	22,3	+0,5	14,5	15,2	-0,7
21 августа	0	20,8	20,7	+0,1	13,7	14,1	-0,4
	3	18,7	18,8	-0,1	12,0	12,4	-0,4
	6	16,7	16,0	+0,7	11,2	11,0	+0,2
	8	18,9	18,6	+0,3	12,0	12,6	-0,6
	10	21,6	21,4	+0,2	13,5	13,9	-0,4
	12	23,2	24,4	-1,2	14,2	15,4	-1,2
	15	25,2	25,4	-0,2	14,1	15,7	-1,6
	18	24,0	22,8	+1,2	12,7	13,9	-1,2
	21	21,5	19,7	+1,8	11,2	11,8	-0,6
22 августа	6	16,8	15,5	+1,3	10,7	10,2	+0,5
	8	16,9	15,7	+1,2	10,6	11,5	-0,9
	10	18,9	17,4	+1,5	11,0	11,9	-0,9
	12	21,5	20,0	+0,5	12,7	12,7	0,0
	15	23,6	23,0	+0,6	12,6	14,4	-1,8
	16	23,4	22,0	+1,4	12,7	13,2	-0,5
	17	22,9	21,5	+1,4	12,4	12,8	-0,4
23 августа	20	17,8	17,5	+0,3	10,0	10,9	-0,9
	7	16,8	15,8	+1,0	9,8	9,3	+0,5
	9	19,5	19,0	+0,5	12,3	11,9	+0,4
	11	22,0	21,0	+1,0	14,9	15,4	-0,5

значениями температуры и влажности в этой точке. Результаты сравнения приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, формулы (1) и (3) в основном правильно отражают процесс изменения влажности над водоемом. Отклонения v_e значений влажности, вычисленных по формулам, от непосредственно измеренных колеблются в пределах 1... 1,5 мм рт. ст. Исключение составляют полуденные часы, когда температура воздуха и поверхности воды достигают максимальных значений. Отклонения v_e в эти часы колеблются от 2 до 5 мм рт. ст.

Отклонения v_e значений температуры, вычисленных по формулам (2) и (4), от измеренных колеблются в пределах $1 \dots 2^\circ \text{C}$ (табл. 1). Учитывая, что отклонения примерно такие же, как и сами разности температур на берегу и над водой, применение формул (2) и (4) для вычисления среднеинтегральных значений температуры воздуха над водоемом теряет смысл. Поэтому при определении среднеинтегрального показателя преломления воздуха над водоемом ограничимся лишь учетом различий влажности над сушей и водой. Пренебрегая различиями температуры над сушей и водой, которые редко превышают $2 \dots 3^\circ \text{C}$ [4, 5], внесем в среднеинтегральный показатель преломления погрешность, не превышающую $2 \cdot 10^{-6}$.

Остановимся на вопросе вычисления среднеинтегрального показателя преломления воздуха.

Формулы (1) и (3) отражают процесс изменения влажности над водоемом в зависимости от расстояния D от берега. Зная закономерность изменения влажности e в каждой точке над водоемом, можно найти выражение для поправки, которую следует вводить в измеренные значения на берегу, чтобы получить среднеинтегральное значение влажности для всей измеряемой линии. Для этого запишем зависимость (2) в виде

$$de = e_D - e' = (e_0 - e') F_2, \quad (5)$$

проинтегрируем ее от 0 до $D/2$ и разделим на $D/2$, где $D/2$ — половина измеряемой линии (влажность возрастает только до центра водоема [1]); при этом за F_2 примем выражение [4]. В результате получим следующую формулу для вычисления поправки Δe в среднеинтегральное значение влажности при измерении последней на берегу:

$$\Delta e = (e_0 - e') [1 - 1,50 / (D/2)^m (1 - m)] / h^k. \quad (6)$$

Учитывая, что поправка Δn в среднеинтегральное значение показателя преломления, обусловленная погрешностью влажности, вычисляется так:

$$\Delta n = \Delta e \, dn/de, \quad (7)$$

запишем

$$\Delta n = (e_0 - e') \{ [1 - 1,50 / (D/2)^m (1 - m)] / h^k \} dn/de. \quad (8)$$

Здесь dn/de — частная производная функции, по которой вычисляется показатель преломления воздуха, по аргументу влажности. Обозначим

$$f = \{ [1 - 1,50 / (D/2)^m (1 - m)] / h^k \} dn/de. \quad (9)$$

Тогда

$$\Delta n = (e_0 - e') f. \quad (10)$$

Для определения величин f составлена табл. 2, аргументами которой являются высота h прохождения радиоволн над водной

поверхностью и половина длины измеряемой линии $D/2$. За величину dn/de при составлении таблицы принято значение частной производной для нормальных условий ($t=15^\circ \text{C}$; $e=12,8$ мм рт. ст.; $P=760$ мм рт. ст.), равное 5,91. Таблица составлена отдельно для инверсионных, равновесных и сверхадиабатических условий.

Таблица 2

Значения f (ед. 6-го знака) для инверсионных, равновесных и сверхадиабатических условий

Условия стратификации атмосферы	$h, \text{ м}$	$D/2, \text{ км}$					
		2	4	6	8	10	12
Инверсионные	1	2,42	2,75	2,93	3,05	3,14	3,21
	2	2,11	2,39	2,55	2,66	2,73	2,80
	3	1,95	2,21	2,35	2,45	2,52	2,58
	5	1,75	1,99	2,12	2,21	2,27	2,32
	10	1,53	1,73	1,85	1,92	1,98	2,02
	20	1,33	1,51	1,61	1,68	1,73	1,76
	50	1,11	1,26	1,34	1,39	1,43	1,47
Равновесные	1	1,30	1,61	1,78	1,89	1,99	2,06
	2	1,18	1,46	1,62	1,72	1,80	1,87
	3	1,11	1,38	1,53	1,62	1,70	1,76
	5	1,04	1,28	1,42	1,51	1,59	1,64
	10	0,94	1,16	1,29	1,37	1,44	1,49
	20	0,86	1,06	1,17	1,24	1,31	1,36
	50	0,75	0,93	1,03	1,09	1,15	1,19
Сверхадиабатические	1	0,56	0,83	0,99	1,11	1,18	1,25
	2	0,52	0,78	0,93	1,04	1,11	1,17
	3	0,50	0,75	0,90	1,00	1,07	1,13
	5	0,48	0,72	0,86	0,96	1,02	1,08
	10	0,45	0,68	0,81	0,90	0,96	1,01
	20	0,42	0,64	0,76	0,84	0,90	0,95
	50	0,39	0,59	0,70	0,78	0,83	0,88

Используя метеорологические определения на Каховском водохранилище, по формуле (10) вычисляли среднеинтегральные значения показателей преломления воздуха для 34 серий измерений линии $K_1 K_2$. За t_0 , t' и e' принимали средние значения температуры поверхности воды, температуры и влажности воздуха на уровне 3 м над водой в точках K_1 и K_2 . Значения выбирались по табл. 2.

Вычисленные значения n сравнивали со значениями показателей преломления n_{123} , полученными по метеорологическим определениям в точках K_1 и K_2 и в дополнительной точке K_3 примерно посредине водохранилища. Результаты сравнения приведены в табл. 3.

Полученные разности Δn для линии длиной 22,4 км можно считать небольшими. В среднем они колеблются в пределах $2 \cdot 10^{-6} \dots 8 \cdot 10^{-6}$, что соответствует погрешности в относительной длине линии от 1 : 500 000 до 1 : 125 000. Лишь в отдельных

случаях (в основном в полуденные и послеполуденные часы) величины превышали значения $8 \cdot 10^{-6} \dots 12 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, определение среднеинтегральных показателей преломления воздуха для радиоволн по предлагаемой методике примерно равноценно способу нахождения показателя преломления по метеорологическим наблюдениям на берегах

Таблица 3

Сравнение значений $\bar{n}$ и n_{123} , вычисленных по метеорологическим определениям на Каховском водохранилище 19—23 августа 1974 г.

Время	$\bar{n}$, ($1 \cdot 10^{-6}$)	n_{123} , ($1 \cdot 10^{-6}$)	$\Delta n =$ $\bar{n} - n_{123}$, ($1 \cdot 10^{-6}$)	Время	$\bar{n}$, ($1 \cdot 10^{-6}$)	n_{123} , ($1 \cdot 10^{-6}$)	$\Delta n =$ $\bar{n} - n_{123}$, ($1 \cdot 10^{-6}$)
19 августа				21 августа			
20	361,7	354,8	+6,9	8	339,8	338,3	+ 1,5
21	359,8	351,4	+8,4	10	346,6	336,5	+10,1
23	361,9	354,9	+7,0	12	348,9	336,8	+12,1
20 августа				15	342,2	327,0	+15,2
0	356,9	348,6	+8,3	18	335,7	333,6	+ 2,1
1	354,0	345,1	+8,9	21	331,2	327,3	+ 3,9
3	365,8	350,5	+6,3	22 августа			
6	359,4	354,5	+4,9	6	335,8	330,6	+ 5,2
8	364,1	358,9	+5,2	8	335,1	333,9	+ 1,2
9	367,8	363,7	+4,1	10	337,9	334,8	+ 3,1
12	370,9	374,9	-4,0	12	340,2	332,4	+ 7,8
15	365,6	364,6	+1,0	15	338,3	332,6	+ 5,7
16	360,9	354,1	+6,8	16	341,6	332,0	+ 9,6
18	357,7	348,3	+9,4	17	336,4	330,0	+ 6,4
21	352,1	346,6	+5,5	20	330,2	326,6	+ 3,6
21 августа				23 августа			
0	346,4	341,8	+4,6	7	329,8	324,7	+ 5,1
3	338,6	335,8	+2,8	9	340,3	333,0	+ 7,3
6	338,1	334,1	+4,0	11	349,2	345,1	+ 4,1

и в дополнительной точке посередине водоема. При невозможности выполнять метеорологические определения в дополнительных точках над водоемом поправки в значения показателей преломления воздуха, полученные на берегах, можно вычислять с помощью формулы (10) и табл. 2. Для этого нужно иметь следующие данные: длину линии D , высоту прохождения луча над водой h , температуру t' , влажность e' на берегу и температуру поверхности воды t_0 .

Эти же формулы и таблицу можно применять при предварительном расчете точности определения среднеинтегрального показателя преломления при выполнении радиодальномерных измерений над водной поверхностью. Такая операция полезна тогда, когда заранее известна необходимая точность измерения линий и требуется решить вопрос о целесообразности радио-

дальномерных измерений при тех или иных метеорологических условиях.

Для примера выполним предварительный расчет точности определения среднеинтегрального показателя преломления на Кременчугском водохранилище для линии Дахновка—Панское длиной 6 км при высоте прохождения радиоволн над водой 1 м. Проведем его на основании выполненных на пункте Дахновка 6—8 июля и на пункте Панское 11—12 июля 1972 г. круглосу-



Рис. 1. Схема расположения точек на пунктах Дахновка и Панское, на которых выполнялись метеонаблюдения 6—12 июля 1972 г.

точных метеорологических измерений. Схема расположения точек, в которых проведены метеонаблюдения, показана на рис. 1.

Температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра определяли на высоте 1 м над поверхностью земли на пункте Дахновка в точке 1 и на пункте Панское в точке 4, расположенных на берегах на удалении 5 м от воды, а температуру поверхности воды — со специальных деревянных мостиков в точках 2 и 3 на удалении 4 м от берега. Метеорологические наблюдения выполняли сериями в начале каждого часа суток 6—8 июля в точках 1 и 2, а 11 и 12 июля — в точках 3 и 4. Каждая серия наблюдений заключалась в трехкратном измерении температуры и влажности воздуха на высоте 1 м, температуры поверхности воды, а также атмосферного давления, скорости и направления ветра. Температуру и влажность воздуха находили с помощью психрометров Ассмана; температуру поверхности воды — по термометру, проградуированному через $0,1^{\circ}\text{C}$. Атмосферное давление определяли по показаниям барометра-анероида, а скорость ветра — с помощью анемометра.

Для всего периода наблюдений с помощью табл. 2 по аргументам $D/2=3$ км и $h=1$ м вычислены значения f , а по формуле (10) предрассчитаны ожидаемые погрешности на протяжении суток в показателях преломления при определении последних на берегу. По вычисленным значениям Δn построены графики их суточного хода (рис. 2).

Из графиков видно, что значения предрассчитанных погрешностей имеют выраженный суточный ход. Кривая суточного хода лежит выше оси абсцисс, т. е. все значения на протяжении суток положительны. Это означает, что длины линий, вычисленные с использованием метеозаэлементов, определенных на берегу, всегда будут завышены. Значения Δn в дневные часы после по-

лудня максимальны, они достигают $15 \dots 18 \cdot 10^{-6}$, что равноценно относительной погрешности в длине линии около $1 : 70\,000 - 1 : 50\,000$. В ночные, предутренние и утренние часы погрешности минимальны и не превышают $4 \dots 5 \cdot 10^{-6}$, что равноценно относительной погрешности в длине линии порядка $1 : 250\,000 - 1 : 200\,000$. Это совпадает с выводами, полученными по результатам метеорологических определений на Каховском водохранилище.

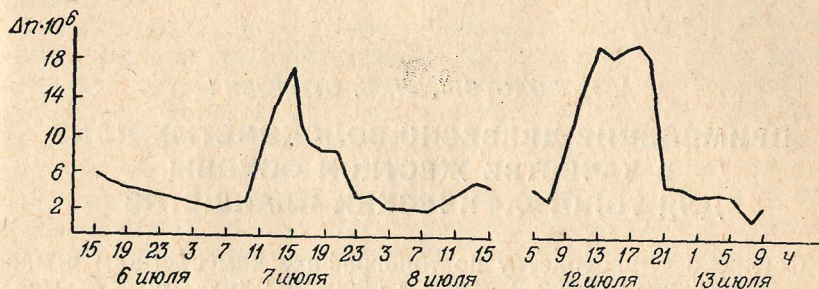


Рис. 2. Графики суточного хода значений Δn , вычисленных по формуле (10) и табл. 2—3.

В заключение отметим, что широкое внедрение радиодальномеров в геодезическую практику в настоящее время сдерживается главным образом не «метеорологическим барьером», а влиянием отраженных сигналов от подстилающей поверхности, которое существенно искажает результаты измерений и в то же время трудно поддается учету. Когда этот недостаток современных радиодальномеров будет преодолен, дальнейшее повышение точности радиодальномерных измерений станет невозможным без учета влияний погрешностей метеорологического происхождения.

Степень ослабления влияния погрешностей представительства метеорологических элементов на точность измеряемых линий зависит от того, как правильно выбрана методика измерений. Выбор методики в каждом отдельном случае зависит от закономерности изменения метеорологических элементов над водоемом. Лишь знание и правильный учет этих закономерностей будут залогом повышения точности радиодальномерных измерений.

Список литературы: 1. Браславский А. П., Викулина З. А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1954. 2. Лисевич М. Ф. Влияние погрешностей метеорологических определений на результаты радиодальномерных измерений над водной поверхностью. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка. В настоящем сборнике. 3. Мозжухин О. А. Метеорология в радиогеодезии. — Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1968. 4. Надеждина Е. Д. Об уточнении методики расчета метеорологических характеристик над водоемом по данным береговых метеостанций. — Тр. ГГО, 1970, вып. 271. 5. Несина Л. В. Изменение метеорологического режима при создании водоемов. — Тр. ГГО, 1965, вып. 167. 6. Тимофеев М. П.

Метеорологический режим водоемов. — Л.: Гидрометеониздат, 1963.
7. *Шпак И. С.* Изменение метеорологических элементов при натекании воздушного потока на водоем. — Сб. работ Цимлянской ГО, 1958, вып. 1.

Работа поступила в редколлегию 24 апреля 1979 года. Рекомендована кафедрой высшей геодезии Криворожского горно-рудного института.
