

М. Ф. ЛИСЕВИЧ

ОБ ОШИБКЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ РАДИОВОЛН В РАВНИННОЙ МЕСТНОСТИ

Режим влажности и режим температуры, которые являются основными факторами, определяющими скорость распространения радиоволн в атмосфере, в слоях, прилегающих к земной поверхности, в большой мере зависят от свойств подстилающей поверхности [6]. В условиях равнинной местности, когда измерения длин линий радиодальномерами ведутся со штативов и когда на всем пути распространения радиоволны будут проходить в непосредственной близости от земной поверхности (рис. 1), скорость распространения радиоволн над участками с различными подстилающими поверхностями будет неодинаковой. Обычно метеоданные определяются лишь в начальной и конечной точках линии, поэтому ошибка в скорости радиоволн зависит от ошибки представительства этих метеоданных их среднеинтегральным значениям на всем пути распространения.

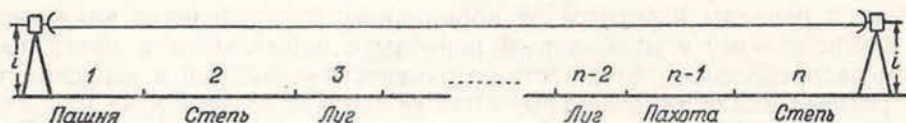


Рис. 1. Прохождение радиоволны над подстилающей поверхностью при расположении станций на штативах.

Если радиолуч проходит над равнинной местностью, состоящей из n участков с различными подстилающими поверхностями (см. рис. 1), причем высота луча на всем пути примерно одинакова, то, считая режим влажности и температуры постоянным на всей длине каждого из участков, среднеинтегральные значения температуры и влажности с известным приближением можем записать:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i l_i}{[l_i]}; \quad (1)$$

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i l_i}{[l_i]}, \quad (2)$$

где l_i — длина i -го ($i=1, 2, 3, \dots, n$) участка, температура и влажность над которым равны t_i и e_i . Если метеорологические элементы определяют только на конечных точках линии, то ошибки представительства температуры m_t и влажности m_e будут следующими:

$$m_t = \frac{t_1 + t_2}{2} - \bar{t}; \quad (3)$$

$$m_e = \frac{e_1 + e_2}{2} - \bar{e}, \quad (4)$$

где t_1 и t_2 , e_1 и e_2 — значения температуры и влажности в начальной и конечной точках линии.

Величины ошибок m_t и m_e тем больше, чем больше длина участков, подстилающие поверхности которых отличаются от подстилающих поверхностей на участках, где расположены начальная и конечная точ-

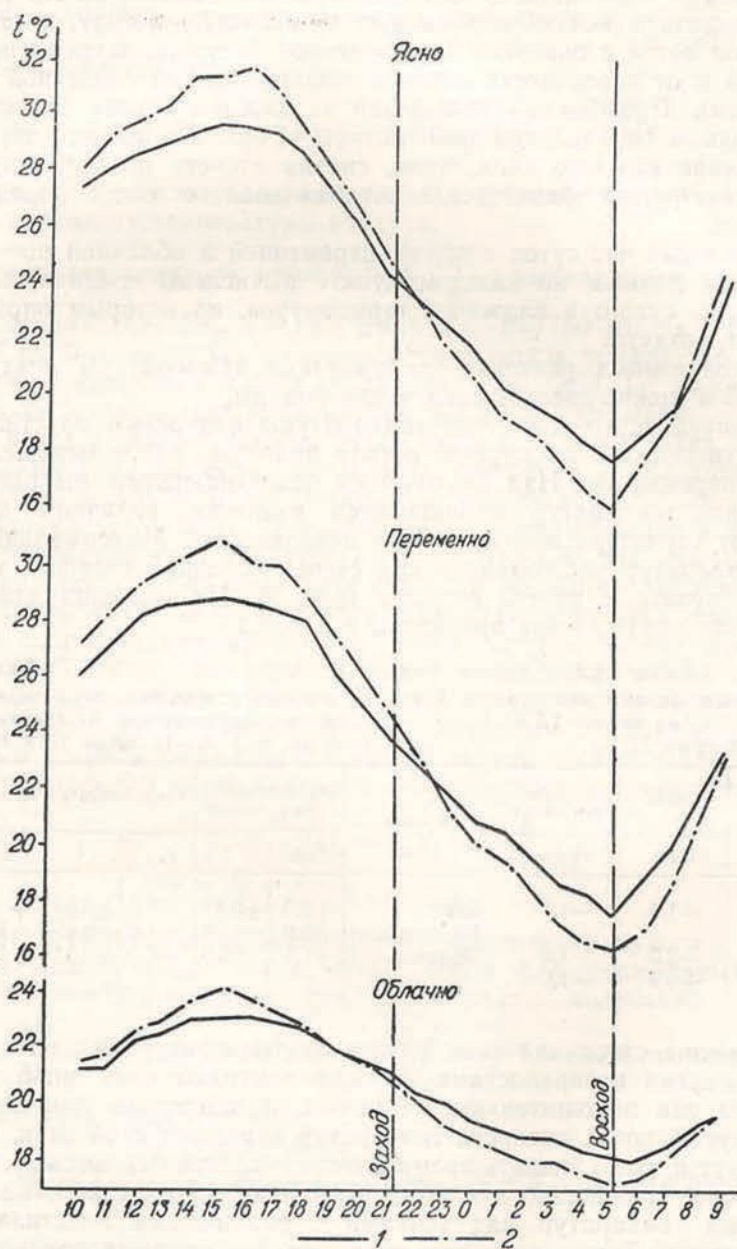


Рис. 2 График суточного хода температуры на высоте 1,5 м:
1 — населенный пункт; 2 — степь.

ки линий, а также, чем больше разница в значениях метеоэлементов над этими участками и их средним значением в начальной и конечной точках.

Цель наших исследований — получить ход разностей температуры t и влажности e над различными подстилающими поверхностями в течение суток и по полученным данным выяснить вопрос о возможных ошибках в определении показателя преломления радиоволн N .

5—12 июня 1972 г. в равнинном лесостепном районе Украины мы выполнили три круглосуточные серии определений температуры и влажности воздуха над четырьмя точками, одна из которых расположена в населенном пункте, вторая — над пахотой, третья над степью и четвертая — над пашней, покрытой ячменем высотой 30 см. Измерения проводили в ясную, переменную и облачную погоду, в штиль и при слабом ветре с помощью психрометров Ассмана, закрепленных на высоте 1,5 м от поверхности земли и защищенных от солнечной радиации зонтами. Программа наблюдений на каждом пункте заключалась в трехкратном определении температуры сухого и влажного термометров в начале каждого часа суток, снятия отсчета по барометру-анероиду, регистрации облачности в пятибалльной системе и определении силы ветра.

На каждый час суток с ясной, переменной и облачной погодой по измеренным данным на каждом пункте вычислены средние значения температуры сухого и влажного термометров, по которым определена влажность воздуха.

Из полученных результатов измерения температуры воздуха на высоте 1,5 м можно сделать следующие выводы.

Амплитуда суточного хода температуры над всеми подстилающими поверхностями в пасмурную погоду примерно вдвое меньше, чем в ясную и переменную. Над различными подстилающими поверхностями в значениях температур наблюдаются разности, величины которых зависят от характера подстилающих поверхностей. Максимальные разности температур наблюдались над степью, с одной стороны, и в населенном пункте, с другой стороны (рис. 2). Их значения для дня и ночи в различную погоду приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальные разности температур ($^{\circ}\text{C}$) на высоте 1,5 м 5—12 июня 1972 г.

Погода	Степь	Населенный пункт
	днем	ночью
Ясно	+1,8	-1,7
Переменно	+2,0	-1,8
Облачно	+0,9	-1,0

Таблица 2

Средние значения разностей влажности $r_{\text{ср.}}$ и их среднеквадратические отклонения δ (мм рт. ст.) 5—12 июня 1972 г.

Погода	Населенный пункт — пахота		Степь — пахота		Пашня — пахота	
	$r_{\text{ср.}}$	δ	$r_{\text{ср.}}$	δ	$r_{\text{ср.}}$	δ
Ясно	+2,3	$\pm 0,43$	+1,0	$\pm 0,29$	+1,8	$\pm 0,27$
Переменно	+2,0	$\pm 0,38$	+1,0	$\pm 0,45$	+1,8	$\pm 0,28$
Облачно	+1,1	$\pm 0,26$	+0,5	$\pm 0,31$	+1,1	$\pm 0,31$

В течение суток значения разностей температур над различными подстилающими поверхностями дважды изменяют свой знак, то есть если днем они положительны, то ночью отрицательны или наоборот. Период суток, когда разности температур изменяют свой знак, довольно растянут и четко указать время его наступления невозможно. В этом случае более правильно говорить о периоде суток с минимальными разностями температур над точками с различными подстилающими поверхностями. Таким периодом являются 2—3 ч, симметрично расположенные к заходу Солнца и 2—3 часа некоторое время спустя после восхода Солнца (см. рис. 2).

Максимальные разности температур наблюдаются днем примерно с 11 до 18 ч, а ночью с 2 до 6 ч. В наших измерениях они не превышали 2° С днем и 1,8° С ночью в переменную и ясную погоду и 0,9° С днем и 1,0° С ночью в облачную погоду (см. табл. 1).

Различие температур над разными подстилающими поверхностями является одной из причин возникновения ошибки представительства показателя преломления m_{Nt} . Эта ошибка может быть охарактеризована величиной

$$m_{Nt} = m_t \frac{\partial N}{\partial t}, \quad (5)$$

где m_t — ошибка представительства температуры и $\frac{\partial N}{\partial t}$ — частная производная функции

$$N = \frac{103,49}{T} (p - e) + \frac{86,26}{T} \left(1 - \frac{5748}{T}\right) e, \quad (6)$$

применяемой для определения показателя преломления радиоволн N [3] по аргументу температуры воздуха.

Учитывая величину производной $\frac{\partial N}{\partial t}$, вычисленную для нормальных условий ($t=15^\circ\text{C}$, $e=12,8$ мм рт.ст., $p=760$ мм рт.ст.) и равную $-1,47$ ед. 6-го знака [2], максимальная разность температур $\pm 2^\circ\text{C}$, которая наблюдалась в наших измерениях (см. табл. 1), может привести к ошибке в показателе преломления $\pm 2,9$ ед. 6-го знака.

Днем и ночью эта ошибка будет иметь различные знаки.

Таким образом, если производить измерения линий днем и ночью, то средний результат будет свободен от этой ошибки.

Однако исключение этой ошибки вряд ли приведет к повышению точности определения показателя преломления N , так как ошибка собственно измерения температуры сухого и влажного термометров совместно с ошибкой за флюктуации температуры воздуха, которые неизбежно сопровождают измерения, вносят в показатель преломления ошибку m'_N такого же порядка, какой имеет исключенная ошибка.

Действительно, ошибка собственно измерения температуры сухого и влажного термометров совместно с ошибками, вызванными флюктуациями в ясную и переменную погоду в летний период, составляет величину m_t около $0,5^\circ\text{C}$ [4]. Учитывая, что влажность e вычисляется [1] как

$$e = E' - \frac{p(t_c - t_{вл}) \left(1 - \frac{t_{вл}}{872,8}\right)}{1756}, \quad (7)$$

частные производные функции (6) по аргументам сухого и влажного термометров t_c и $t_{вл}$, вычисленные нами для нормальных условий ($t=15^\circ\text{C}$, $e=12,8$ мм рт.ст., $p=760$ мм рт.ст.), получаем:

$$\frac{\partial N}{\partial t_c} = -4,5 \text{ ед. 6-го знака}; \quad \frac{\partial N}{\partial t_{вл}} = +7,9 \text{ ед. 6-го знака}.$$

Учитывая вышесказанное,

$$m'_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial t_c}\right)^2 m_{t_c}^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial t_{вл}}\right)^2 m_{t_{вл}}^2} = \pm 4,5 \text{ ед. 6-го знака}.$$

что даже в 1,5 раза больше ошибки, которую может вызвать в показателе преломления максимальная ошибка представительства температуры.

Несколько по-иному происходит изменение влажности над различными подстилающими поверхностями. Значения влажности, вычисленные для высоты 1,5 м над каждой из четырех точек, имели ощутимые различия в каждый момент. Для сравнения в качестве эталона взята пахота. На каждый час измерений вычислены разности в значениях влажности в населенном пункте, над степью и пашней с ячменем, с одной стороны, и пахотой, с другой стороны. Эти разности незначительно изменялись в течение суток, о чем свидетельствуют небольшие средние

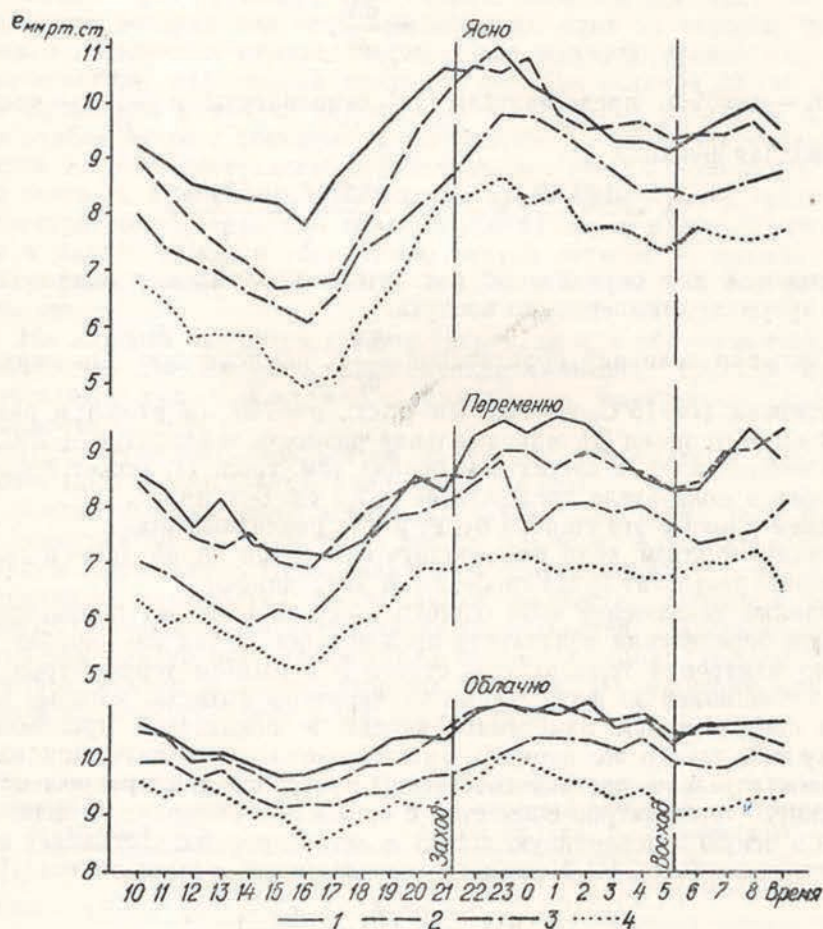


Рис. 3. График суточного хода влажности на высоте 1,5 м:
1 — населенный пункт; 2 — пашня; 3 — степь; 4 — пахота.

квадратические отклонения δ разностей влажности, вычисленных на каждый час суток от их средних значений $r_{\text{ср}}$ в течение суток (табл. 2).

По этим значениям, а также по графикам суточного хода влажности (рис. 3) легко заметить, что на уровне 1,5 м от поверхности земли (то есть на высоте прохождения радиолуча при измерении линии со штативов), разности влажности над различными подстилающими поверхностями могут достигать значительных величин. Самые большие средние разности в значениях влажности наблюдались в ясную и переменную погоду над населенным пунктом и пахотой (2,3 мм рт. ст. для ясной и 2,0 мм рт. ст. для переменной погоды), а также над пашней с ячменем и пахотой (1,8 мм рт. ст. для ясной и 1,8 мм рт. ст. для переменной погоды); над степью и пахотой эти значения несколько меньше (1,0 мм рт. ст. для ясной и 1,0 мм рт. ст. для переменной погоды).

В облачную погоду соответствующие разности примерно вдвое меньше (1,1 мм рт. ст. над населенным пунктом и пахотой, 1,1 мм рт. ст. над пашней с ячменем и пахотой и 0,5 мм рт. ст. над степью и пахотой).

Амплитуда колебаний суточного хода влажности над разными подстилающими поверхностями примерно одинакова, однако в облачную погоду для всех участков она вдвое меньше, чем в переменную и ясную.

Совершенно очевидно, что наличие разностей влажности над различными подстилающими поверхностями обусловлено такими свойствами подстилающей поверхности, как растительный покров, термические свойства, степень увлажнения, альbedo и т. д. Величина этих разностей в большой мере зависит также от состояния погоды, а именно — облачности, силы ветра, общего состояния влажности атмосферы. Максимальных ошибок представительства влажности следует ожидать в ясную и переменную погоду при отсутствии ветра, способствующего перемешиванию воздушных слоев атмосферы, а также, когда участки, над которыми проходит радиолуч на всем пути, и участки, на которых находятся начальная и конечная точки линии, являются подстилающими поверхностями с максимальными значениями разностей влажности (пашня с растительностью и пахота, пахота и населенный пункт и др.). Большое количество факторов, влияющих на режим влажности над разными подстилающими поверхностями, приводит к невозможности определения ошибки представительства влажности при рядовых радиодальномерных измерениях, то есть тех, которые выполняются на производстве.

Поэтому результаты измерения длин линий так или иначе будут подвергаться влиянию ошибки представительства влажности.

Ошибка в показателе преломления m_{N_e} , таким образом, будет зависеть от ошибки представительства влажности m_e

$$m_{N_e} = m_e \frac{\partial N}{\partial e}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial N}{\partial e}$ — частная производная функция (6) по аргументу влажности.

При нормальных условиях ($t=15^\circ\text{C}$, $e=12,8$ мм рт. ст., $p=760$ мм рт. ст.) $\frac{\partial N}{\partial e} = +5,91$ [2].

Учитывая это значение, а также полагая, что максимальная ошибка представительства влажности m_e может достигать в ясную и переменную погоду 1,8—2,3 мм. рт. ст. (табл. 2), по формуле (8) вычисляем, что ошибка в показателе преломления может достичь 10,6—13,6 ед. 6-го знака. Такая ошибка окажет ощутимое влияние на точность измеренной линии.

Уменьшение ошибок представительства метеоданных предусмотрено методикой измерения линий шестью приемами в полигонометрии 2 класса, распределяющимися по возможности равномерно в течение двух суток [5]. Но поскольку из всего сказанного следует, что основную ошибку в показателе преломления за различия подстилающих поверхностей вызывает ошибка представительства влажности, при этом разности влажности над различными подстилающими поверхностями мало изменяются в течение суток, то ошибка представительства влажности, а следовательно, вызванная ею ошибка в показателе преломления будут систематическими для этой линии в любое время суток.

Таким образом, в равнинных районах методика, предполагающая измерения длины линии в течение двух дней, вряд ли приведет к улучшению результатов. Исходя из вышеизложенного, мы считаем, что в

этих районах измерения длин линий радиодальномерами намного проще и быстрее производить в один период суток, не снижая при этом точности полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев Ю. Г., Гричук Ю. П., Яровой Б. Д. Таблицы для вычислений длины сторон полигонометрии и триангуляции 1 и 2 классов, измеренных светом и радиодальномерами. М., «Недра», 1969.
2. Кравцов Н. И. Об изменении показателя преломления при радиогодезических измерениях в зимний период. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», Львов, 1970, вып. 12.
3. Иордан В., Эггерт О., Кнейссль М. Руководство по геодезии, т. 6. Перевод с нем. М., «Недра», 1971.
4. Мозжухин О. А. Метеорология в радиогодезии. Кишинев, «Картя Молодовеняскэ», 1968.
5. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР, М., «Недра», 1966.
6. Lang H. Über den Einfluß der lodennaher Luftschicht auf die Mikrowellen — Entfernungsmessung. — Arbeiten aus dem Vermessungs- und Kartenwesen der DDR. Bd. 19. Leipzig, 1969.

Работа поступила в редколлегию 11 июня 1973 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.