

УДК 551.5

Ж. Б. ХАЧАТРЯН, С. А. МХИТАРЯН

### ТРЕБОВАНИЯ К СВЧ АППАРАТУРЕ ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ АРМЕНИИ

Базируясь на данных радиозондирования, проведенного в Ереване, в различные сезоны года получили соотношение, связывающее абсолютную влажность у поверхности земли  $\rho$  и общее влагосодержание атмосферы  $R$ . Показано, что  $R = A\rho$ , где  $A$  имеет значение  $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ , что достаточно хорошо согласуется с данными, полученными в иных климатических условиях. На основе анализа данных радиозондирования рассчитываются ожидаемые значения радиоярких температур на длине волны 1,35 см, соответствующей центру полосы поглощения водяного пара, и обосновываются требования к СВЧ радиометрическому комплексу влажностного зондирования атмосферы.

Цель данной работы попытаться наметить перспективы радиометрических методов измерения влагосодержания атмосферы по ее собственному тепловому излучению для территории горных районов Армении.

Уже в работах [1—5] обсуждается возможность использования СВЧ диапазона для влажностного зондирования атмосферы. Отмечается, что точность измерения влажности атмосферы является решающим фактором для внедрения в практику аэрологических наблюдений СВЧ радиометрических методов.

Доказано, что СВЧ радиометрическая аппаратура первого поколения, чувствительность которой составляла около 2К, а точность измерения температуры порядка 10К, позволяла определить при использовании обычной методики общее влагосодержание даже для летних месяцев с погрешностью, превышающей 10%.

Известно из работ [4, 6], что, измерив температуру и влажность у поверхности земли при помощи психрометра, можно «восстановить» вертикальный профиль влажности, оценить значение интегральной влажности атмосферы. Точность такого «восстановления» существенно зависит от априорной информации об особенностях формирования поля влажности для данного района в различные сезоны года. Обработка обширного экспериментального материала, полученного в ходе проведения месячных серий учащенного зондирования (выпуск зондов проводится через каждые 2 часа в течение месяца) для средневропейской территории страны, убедительно показала [4], что между абсолютной влажностью у поверхности земли и интегральной влажностью  $R$  существует достаточно жесткая связь.

Анализ полученных материалов позволяет оценить до некоторой степени и «ошибки» радиозондирования, которые, если постулировать, что резкие изменения интегральной влажности через двухчасовой интервал маловероятны, составляют примерно девять процентов. Однако распространение полученных в [4] выводов на другие районы с иными

погодными и климатическими условиями представляется не совсем правильным. Особенно это относится к экватории морей и океанов, высокогорью, пустыням и т. д. Поэтому для того чтобы научно обосновать требования к СВЧ радиометрическому комплексу зондирования атмосферы, предназначенному для определения влажности в горных районах Армении, необходимо было обработать и проанализировать данные радиозондирования, полученные в Армении для различных сезонов. Для анализа было выбрано 6 серий выпусков радиозондов, относящихся к январю 1982—83 гг., марту 1982—83 гг., июлю и сентябрю 1982 г. Каждая серия включала от 23 до 29 последовательных выпусков радиозондов, которые проводились через каждые 6 часов. Всего было обработано 163 выпуска.

Задача, поставленная в настоящей работе, состоит, как и в [4], в том, чтобы установить связь между абсолютной влажностью у поверхности земли и интегральной влажностью атмосферы.

Методика расчета интегральной влажности аналогична той, которая использована в [5]: 
$$R = \sum_{i=1}^N \rho_i(h) \Delta h_i,$$

где  $\rho_i(h)$  — абсолютная влажность  $i$ -го слоя, находящегося на высоте  $h$ ,  $\Delta h_i$  — толщина  $i$ -го слоя.

Ввиду значительных погрешностей измерения влажности при отрицательных температурах и малого влияния водяного пара, содержащегося в верхних слоях, на величину интегральной влажности было решено ограничить величину  $h_{\max}$  высотой 6 км.

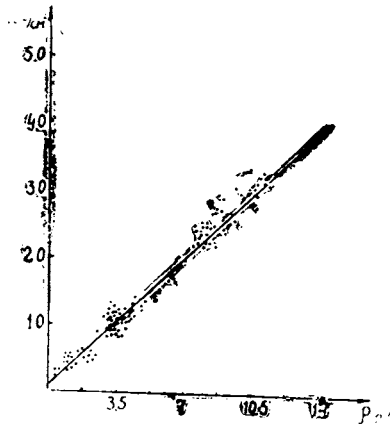


Рис. 1. Взаимосвязь между интегральной и абсолютной влажностями у поверхности земли.

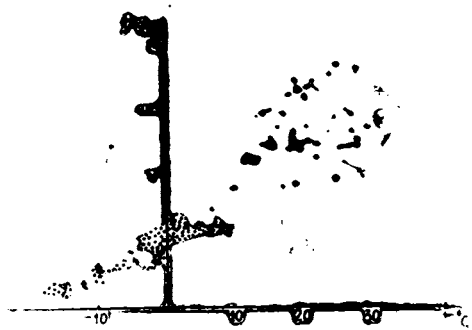


Рис. 2. Взаимосвязь между температурой и абсолютной влажностью у поверхности земли.

Результаты обработки данных радиозондирования и результаты, указывающие на взаимосвязь между интегральной влажностью и влажностью у поверхности земли, представлены на рис. 1. Они достаточно плотно расположены относительно прямой

$$R = A\rho \text{ кг/м}^2,$$

где  $A$  — коэффициент, численно равный  $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ , имеет физический смысл характеристической высоты. Отметим, что, по данным различных авторов, эта величина колеблется от 2,1 до 2,7, составляя в среднем 2,3.

Зависимость  $R = f(\rho)$  получена нами в значительно более широком диапазоне значений влажности, по сравнению с той, которая приведена в [4]. Отмечается значительный разброс точек относительно аппроксими-

рующей прямой  $R=2,2 \cdot 10^{-3} \rho$  при больших влажностях у поверхности земли. Кривая  $\rho=\rho(T)$  представлена на рис. 2 и указывает на то, что связь между  $\rho$  и  $T$  даже у поверхности земли менее жесткая, чем между  $R$  и  $\rho$ .

Значительный интерес могут представить полученные в работе для различных сезонов значения коэффициентов взаимной корреляции  $\Gamma_{\rho R}$  между  $\rho$  и  $R$ , также между изменениями этих величин для ближайших сроков.

Эти значения рассчитывались по известной формуле

$$\Gamma_{\rho R} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i - \bar{\rho})(R_i - \bar{R})}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i - \bar{\rho})^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2 \right]^{1/2}}$$

и сведены в табл. 1.

Таблица 1

№№ пп	Время измерений и измеряемые величины	Средние величины	Количество измерений	$\sigma_{\rho}$	$\sigma_R$	$\Gamma_{\rho R}$
1	январь, 1983 г. $\rho$ г/м <sup>3</sup> $R$ кг/м <sup>2</sup>	1,9 5,6	24	1,0	2,7	0,94
2	март, 1983 г. $\rho$ г/м <sup>3</sup> $R$ кг/м <sup>2</sup>	9,17 3,79	27	1,18	2,74	0,96
3	сентябрь, 1982 г. $\rho$ г/м <sup>3</sup> $R$ кг/м <sup>2</sup>	11,7 29,0	28	1,82	5,07	0,72
4	январь, 1982 г. $\rho$ г/м <sup>3</sup> $R$ кг/м <sup>2</sup>	3,84 10,6	28	1,24	2,94	0,67
5	июль, 1982 г. $\rho$ г/м <sup>3</sup> $R$ кг/м <sup>2</sup>	9,6 24,3	28	1,03	3,3	0,67
6	март, 1982 г. $\rho$ г/м <sup>3</sup> $R$ кг/м <sup>2</sup>	4,68 4,7	29	0,68	1,7	

Здесь  $\sigma_{\rho}$  и  $\sigma_R$ —соответственно стандартные отклонения для абсолютной влажности у поверхности земли в г/м<sup>3</sup> и полного влагосодержания атмосферы в кг/м<sup>2</sup>.

При анализе материалов табл. 1 следует обратить внимание на то обстоятельство, что для одних и тех же месяцев, например, января 1982 и 1983 годов среднее значение интегральной влажности изменяется почти в два раза, в то время как для первого месяца весны—марта эти изменения были незначительными, составляя менее 15%.

Для определения взаимосвязи между перестройкой поля влажности у поверхности земли и полным влагосодержанием атмосферы можно представить величины  $\Delta\rho = \rho_n - \rho_{n+1}$  и  $\Delta R = R_n - R_{n+1}$ , где  $\rho_n$ ,  $\rho_{n+1}$

—абсолютная влажность у поверхности земли в моменты времени, соответствующая двум ближайшим выпускам радиозондов, а  $R_n$  и  $R_{n+1}$  полное влагосодержание атмосферы для тех же сроков, что и для  $p_n$  и  $p_{n+1}$ , полученных по данным радиозондирования.

В табл. 2 приведены средние стандартные отклонения и значения взаимной корреляции для  $\Delta p$  и  $\Delta R$  для тех же серий измерений, что видим в табл. 1.

Таблица 2

№№ п/п	Время изме- рений и из- меряемые величины	Средние значения	Количество измерений	$r_{\Delta p \Delta R}$	$\sigma_{\Delta R}$	$\sigma_{\Delta p}$
1	январь, 1983 г. $\Delta p$ г/м <sup>3</sup> $\Delta R$ кг/м <sup>2</sup>	-0,02 0,14	23	0,93	1,38	0,54
2	март, 1983 г. $\Delta p$ г/м <sup>3</sup> $\Delta R$ кг/м <sup>2</sup>	0,11 0,26	26	0,78	1,85	0,78
3	сентябрь, 1982 г. $\Delta p$ г/м <sup>3</sup> $\Delta R$ кг/м <sup>2</sup>	-0,14 -0,21	27	2,42	6,35	0,61
4	январь, 1982 г. $\Delta p$ г/м <sup>3</sup> $\Delta R$ кг/м <sup>2</sup>	-0,10 -0,25	27	0,73	1,87	0,32
5	июнь, 1982 г. $\Delta p$ г/м <sup>3</sup> $\Delta R$ кг/м <sup>2</sup>	-0,01 -0,02	27	1,09	3,55	0,71
6	март, 1982 г. $\Delta p$ г/м <sup>3</sup> $\Delta R$ кг/м <sup>2</sup>	0,11 -0,06	28	0,86	1,16	0,65

Анализируя данные, приведенные в табл. 2, можно сделать вывод о том, что и взаимная корреляция между временными измерениями абсолютной влажности у поверхности земли и общим влагосодержанием атмосферы достаточно высока, но несколько ниже. Это указывает на то, что перестройка поля влажности в горных районах может иметь у поверхности земли и на высотах различные закономерности. Проведенные расчеты позволяют оценить ожидаемые значения радиояркостных температур и поглощения для горных районов, а главное оценить их временную изменчивость.

Это в свою очередь дает возможность определить требования к СВЧ радиометрическому комплексу влажностного зондирования атмосферы.

Был проведен расчет радиояркостной температуры атмосферы по данным радиозондирования в Ереване.

Расчетная формула, связывающая радиояркостную температуру с метеорологическими величинами и углом, при котором проводятся наблюдения, имеет вид [4].

$$T_{\text{я}}(\varphi, \theta) = \sec \theta \int_0^h T(h) \left[ \tau_{\text{H}_2\text{O}}(v, h) + \frac{\tau_0(\infty, v)}{5,3} e^{h/5,3} \right] \times$$

$$\begin{aligned} & \times e^{-\sec\theta} \int_0^h [\tau_{H_2O}(v, h) + \tau_{O_2}(v, h)] dh, \\ & \tau_{O_2}(v, h) = \tau_{O_2}(v, \infty)(1 - e^{-h/5.3}), \\ & \tau_{H_2O}(v, h) = \{3.24 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{644}{T(h)}} \frac{v^2 \rho(h) p(h)}{T(h)^{3.125}} \left[ 1 + 0.0147 \frac{\rho(h) T(h)}{p(h)} \right] \times \\ & \times \left[ \frac{1}{(v - 22.235)^2 + (\Delta v)^2} + \frac{1}{(v + 22.235)^2 + (\Delta v)^2} \right] + 2.55 \cdot 10^{-8} \rho(h) v^2 \times \\ & \times \frac{\Delta v}{T(h)^{3/2}} \} 10^{-5}, \\ & \Delta v = 2.58 \cdot 10^{-3} \left[ 1 + 0.0177 \frac{\rho(h) T(h)}{p(h)} \right] \frac{p(h)}{\left( \frac{T(h)}{318} \right)^{0.625}}, \end{aligned}$$

где  $\tau_{O_2}(\theta, h)$  и  $\tau_{H_2O}$  — поглощения в кислороде и водяном паре на высоте  $h$  и при частоте  $v$ ;  $\rho(h)$ ,  $T(h)$ ,  $P(h)$  — высотные распределения абсолютной влажности, температуры, давления;  $\Delta v$  — полуширины спектральной линии. Взаимосвязь полученных данных радиояростной температуры для вертикального зондирования атмосферы в диапазоне длин волн 1,35 см и интегральной влажности, по данным радиозондирования, представлены на рис. 3. На основе полученных результатов можно прийти к важному заключению, что собственная радиояростная температура с достаточно высокой надежностью позволяет судить о величине общего влагосодержания атмосферы. Анализ результатов показывает, что максимальные отклонения радиояростной температуры при фиксированной интегральной влажности, приходящиеся на интервал значений  $R = 20 - 30 \text{ кг/м}^2$ , составляют около 5–7К относительно среднего значения. При минимальных значениях влажности от 5 до 15  $\text{кг/м}^2$  ожидаемые отклонения значений должны редко превышать 1,5–2К.

Исходя из вышесказанного, получаем достаточно жесткие требования к необходимой чувствительности и стабильности работы СВЧ радиометрической аппаратуры. Действительно, для реализации метода, обеспечивающего точность измерения интегральной влажности  $\pm 5 - 7\%$ , СВЧ радиояростная температура при малых значениях интегральной влажности 5–17  $\text{кг/м}^2$  должна составлять, если используется простейшая методика измерений радиояростных температур при вертикальном зондировании, около 1К.

Авторы благодарны проф. А. Г. Горелику за обсуждение результатов и сделанные замечания при подготовке рукописи.

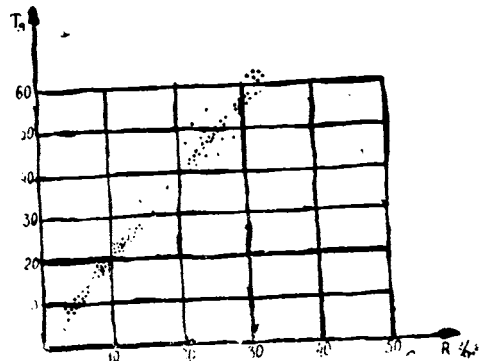


Рис. 3. Влияние абсолютной влажности на радиояростную температуру для длины волны 1,35 см, соответствующей центру полосы поглощения водяного пара.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кисляков А. Г. Об определении поглощения радиоволн в атмосфере по ее собственному излучению.—Радиотехника и электроника, 1968, XIII, № 7, с. 1161—1168.
2. Рабинович Ю. И., Щукин Г. Г. Определение содержания водяного пара в атмосфере по измерению микроволнового излучения.—Тр. ГГО, 1966, вып. 222, с. 62—73.
3. Плечков В. М. Предварительные результаты определения влагосодержания атмосферы по измерениям ее теплового радиоизлучения вблизи  $\lambda=1,35$  см.—Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1968, IV, № 2, с. 182—187.
4. Горелик А. Г., Калашников В. В., Фролов Ю. А. Определение общего влагосодержания атмосферы по ее собственному радиоизлучению.—Тр. ЦАО, вып. 103, 1972.
5. Жевакин С. А., Троицкий В. С., Цейтлин Н. М. Радиоизлучение атмосферы и исследование поглощения сантиметровых радиоволн.—Изв. ВУЗ-ов СССР, Радиофизика, 1958, т. I, № 2, с. 19.
6. Райкова Л. С., Фролов Ю. А. Статистическое распределение поля микроволнового излучения атмосферы в северном полушарии.—Тр. ГосНИЦ ИПР, 1977, вып. 4, с. 29—35.

Ճ. Բ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ս. Ա. ՄԽԻՏՐՅԱՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԼԵՆԻՆԱՅԻՆ ՇՐՋԱՆՆԵՐՈՒԹՅԱՆ ՄԹԵՆՈՂՈՐՏԻ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅԱՆ  
ՉՈՆԴԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՆԱԽԱՏԵՍՎԱԾ ԳԲՀ ՍԱՐՔԱՎՈՐՄԱՆ  
ՆԵՐԿԱՅԱՑՎՈՂ ՊԱՆԱՆՋՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո ս

Հենվելով Երևանում կատարված ռադիոզոնդավորման տվյալների վրա, ստացված է մի առնչություն, որը կապ է հաստատում երկրամերձ շերտի օրացարձակ խոնավության և մթնոլորտի  $R$  լրիվ խոնավության միջև: Ցույց է տրված, որ  $R = A\rho$ , որտեղ  $A$ -ն ընդունում է  $2,2 \cdot 10^{-3}$  մ<sup>-1</sup> արժեքը, որը բավականաչափ լավ է համընկնում այլ կլիմայական պայմանների համար ստացված արդյունքների հետ: Ռադիոզոնդավորման տվյալների վերլուծության միջոցով գնահատված է 1,35 սմ ալիքի երկարության վրա սպասվող ռադիոպայծառության շերմաստիճանը: Վերջինիս միջոցով հիմնավորվում են մթնոլորտի խոնավության զոնդավորման համար ռադիոմետրական կոմպլեքսին ներկայացվող պահանջները, քանի որ 1,35 սմ ալիքի երկարությունը համապատասխանում է ջրային գոլորշիների կլանման շերտին: