
УДК 621.371

С. И. БАБКИН, канд. техн. наук, *В. И. КУЦЕНКО*, *Н. Г. МАКСИМОВА*,
А. Ю. ПАНЧЕНКО, *Е. Г. ПРОШКИН*, канд. техн. наук, *Ю. Н. УЛЬЯНОВ*

**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ДВУХ МЕТОДИК РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО
ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ. СООБЩЕНИЕ 2.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Разработка эксперимента по сравнительной оценке погрешностей измерения температуры воздуха радиоакустическим зондированием (РАЗ) атмосферы в различных метеоусловиях позволила выделить в качестве объекта исследования две методики РАЗ для дистанционной

регистрации вертикального распределения температуры в пограничном слое: методику «Точка» — с подстройкой под условие Брэгга по трассе зондирования и методику «Трасса» — без подстройки. Уже первые измерения температуры воздуха аппаратурой РАЗ показали большую изменчивость профилей температуры. Для сглаживания последних производится усреднение данных зондирования за интервалы времени, принятые для усреднения в метеорологии (2, 3, 10, 15 мин), однако и после такой операции наблюдается заметная изрезанность профилей по сравнению с результатами, полученными метеодатчиками. Эта особенность РАЗ позволяет исследовать интенсивность и характер пульсаций температуры воздуха в пограничном слое, определяющих условия распространения УКВ в тропосфере и динамику образования и рассеяния тумана различного происхождения. Чтобы выделить часть дисперсии флюктуаций температуры, характеризующую атмосферные пульсации температуры воздуха, необходимо оценить дисперсию, обусловленную аппаратурой и методикой РАЗ атмосферы.

При натуральных испытаниях дециметровая система РАЗ была размещена на экспериментальном метеорологическом полигоне (ЭМП), удаленном от берега моря на расстояние 500 м. Метеонаблюдения велись с помощью штатных датчиков, установленных на метеомачте на уровнях 2 и 14 м. В некоторых случаях использовались данные радиозонда. Расстояние между контрольно-измерительным участком с метеодатчиками и РАЗ составляло 125 м, перепад высот над уровнем моря — 5 м; расстояние от ЭМП до площадки РЗ — 7 км.

Регистрация вертикальных профилей температуры воздуха по указанным выше методикам выполнялась в различных метеорологических условиях. Основным фактором, усложняющим РАЗ, был ветер. Горизонтальный перенос зондирующего пакета звуковых волн относительно антенного устройства средним ветром при неизменяющейся с высотой скорости ветра определялся по формуле $d = VR/C_{зв}$ (1), где $C_{зв}$ — скорость звука; V — скорость ветра; R — высота зондирования. В ходе эксперимента установлено, что методика «Трасса» более эффективна в случае, если скорость ветра в зондируемом слое не превышает 3 м/с. В реальных условиях зондирования методика «Точка» целесообразна при скоростях ветра, больших 3—4 м/с. При этом кроме подстройки частоты звукового генератора и ориентирования антенного устройства дополнительно требуется перемещение, акустического излучателя против направления ветра на расстояние, компенсирующее горизонтальный перенос пакета излучаемых звуковых волн. Если информация о вертикальном распределении скорости ветра отсутствовала, действие ветра на пакет компенсировалось последовательным передвижением акустического излучателя на расстояние 0,5—3 м. На время перемещения последнего звуковой генератор выключался, а специализированное вычислительное устройство (СВУ) «Электроника ДЗ-28» переводилось в режим ожидания. После установки акустического излучателя включался генератор звуковых импульсов и производилась подстройка его частоты под условие Брэгга на следующем высотном уровне измерения температуры до достижения максимального отношения сигнал-шум. Затем СВУ производит на-

копление данных зондирования и вычисление температуры. Перемещение акустического излучателя увеличивает время регистрации результирующего профиля.

Регистрация профиля температуры по методике «Точка» в целях оценки ее дисперсии при скорости ветра на максимальной высоте зондирования 7 м/с выполнялась 4 октября 1985 г. Корректное применение статистических методов при обработке данных температурного зондирования, в частности, для построения доверительных интервалов погрешности профиля методом РАЗ, требует знания функции распределения погрешностей измерения данным методом. В настоящее время она не известна. Поэтому для установления доверительных границ погрешностей функция определялась экспериментально. Сначала находилось отклонение текущего значения температуры от среднего на заданном уровне зондирования, т. е. $\Delta T = T_i - \bar{T}$. Затем по критерию Пирсона (или по расчетам коэффициентов асимметрии и эксцесса) оценивалось соответствие эмпирического распределения отклонений температуры ΔT нормальному распределению. В большинстве случаев принималась гипотеза о нормальном распределении отклонений ΔT , а чтобы построить доверительные границы, использовался известный способ [1]. Если экспериментальная функция распределения значительно отклонялась от нормального распределения, то доверительная случайная погрешность ϵ_0 вычислялась согласно [1] $\epsilon_0(\alpha) = \sigma_T \delta$ (2).

Здесь α — доверительная вероятность, $\alpha = 1 - 1/\delta^2$; δ — квантиль распределения; σ_T — оценка среднеквадратичного отклонения температуры. Когда распределение погрешностей было одномодальным и симметричным, квантиль δ выбирался в соответствии с формулой $\alpha = 1 - H/(q\delta^3)$ (3).

Доверительная вероятность принималась $\alpha = 0,95$, а для определения среднеквадратичного отклонения случайной погрешности измерения температуры использовалось соотношение (1)

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

где n — число отдельных измерений на каком-либо уровне.

На рис. 1 изображены вертикальные профили температуры воздуха с рассчитанными доверительными интервалами. Знаком \times обозначен профиль температуры, построенный при таких данных радиовонда «Марз-1»:

R, м 16, 38, 72, 119, 140, 147, 170, 218, 242, 276, 284, 316
 V, м/с 1,5; 2; 1; 2,3; 2,8; 3,0; 3,3; 3,8; 4,9; 5,3; 6,2; 6,4; 7,1

Представленные профили указывают на наличие инверсии температуры в зондируемом слое, причем со временем верхняя граница инверсии смещается в сторону больших высот. С увеличением высоты зондирования дисперсия температуры обнаруживает тенденцию к росту. Увеличение дисперсии на высотах 180 м (время зондирования 00 ч 05 мин)

и 250 м (01 ч 22 мин) по сравнению со средним значением для про- свидетельствует о смещении турбулизованного слоя, обычно размеще- ющегося над верхней границей инверсии, вертикально вверх по мере возрастания мощности последней. Сравнение профилей температуры, полученных аппаратурой РАЗ и датчиками радиозонда, указывает на более широкие возможности метода РАЗ для изучения тонкой структуры нижней части пограничного слоя, поскольку он позволяет производить регистрацию профилей с высоким пространственным разрешением (5 — 10 м) и малой погрешностью (~ 0,1 К).

Эффективность методики «Трасса» при умеренном ветре (4 — 5 м/с) проверялась в условиях возникновения, существования и рассеяния прибрежного адвективного тумана 28 марта 1985 г. Как показывают данные табл. 1, в 14 ч 45 мин (приближение тумана к ЭМП) происходила перестройка профиля температуры, поскольку в слое 30—90 м температура заметно повышалась. В дальнейшем ее повышение распространяется вверх, за пределы высоты зондирования (в программу СВУ был заложен анализ температурного 150 м). В условиях тумана наблюдалась

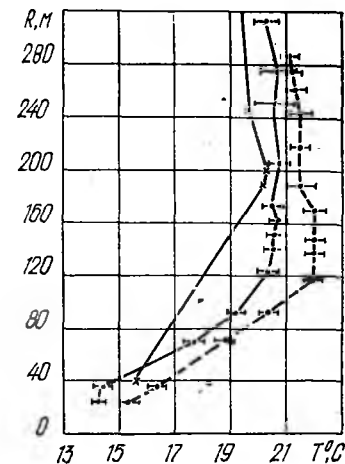


Рис. 1

распределения до высоты повышенной изменчивость

Таблица 1

Время наблюдений, ч—мин	Измерения метеодатчиками			РАЗ										
	Высота, м	2	14	18	31	45	59	72	86	100	114	128	141	154
		Дальность видности, м	Температура, °С											
14—05	350	0,9	0,6	1,1	1,2	1,6	1,5	1,8	1,7	2,1	1,9	1,9	—	—
14—45	400	0,6	0,2	0,95	1,9	2,2	2,0	2,0	2,3	1,1	1,1	1,45	1,1	1,5
15—25	250	0,6	0,2	1,5	1,9	2,15	1,46	1,9	1,9	1,5	1,5	1,25	1,5	1,5
15—45	270	0,3	—0,1	1,0	2,5	2,3	1,9	1,8	1,9	1,9	1,0	2,0	0,7	0,16
16—25	240	0,7	—	—	0,8	1,8	1,4	1,7	1,7	1,7	1,9	1,9	2,1	2,1
16—27	—	—	—	0,7	2,2	1,8	2,3	1,7	2,2	1,7	2,0	1,9	2,1	1,9
16—29	—	—	—	0,4	2,1	2,3	2,2	2,1	1,6	1,6	2,1	1,8	2,3	2,1
16—31	200	0,8	—	0,6	2,0	1,4	1,3	1,1	1,1	1,8	1,8	2,3	1,7	1,4
16—33	—	—	—	0,5	0,9	2,4	1,9	1,8	1,8	1,9	1,9	2,1	2,6	2,4
16—45	180	0,6	—	1,1	—	1,0	1,0	1,1	1,1	1,5	1,6	1,9	1,8	1,9
17—00	190	0,8	—	2,1	2,1	1,7	1,6	1,8	2,1	2,1	1,7	0,9	—	—
17—30	180	0,7	—	3,9	2,9	2,1	1,8	1,3	1,3	0,8	—0,3	—0,7	—0,7	0,3
19—00	1800	1,0	—	1,0	—0,5	—0,7	—0,3	0,3	0,3	0,2	—0,6	0,3	0,9	—0,3

профиля в зондируемом слое атмосферы, что вызывалось, по-видимому, сильной неоднородностью структуры перемещающегося над ЭМП тумана. Это подтверждается и значениями дисперсии температуры воздуха, приведенными в табл. 2, поскольку они независимо от высоты и времени зондирования колеблются в пределах от 0,001 К², что соответствует инструментальной погрешности используемой в эксперименте аппаратуры, до 3,1 К². В 17 ч 30 мин началась вторая перестройка профиля, что совпало по времени с началом рассеивания тумана; к 19 ч туман рассеялся. По данным табл. 2, достаточно сложно судить о зависимости погрешности измерения температуры от высоты зондирования.

Таблица 2

Время наблюдений, ч — мин	Дальность видности, м	Дисперсия флуктуаций температуры на высотах, м										
		18	31	45	59	72	86	100	114	128	141	154
14—45	400	0,005	0,002	0,030	0,015	0,010	0,100	0,077	0,380	0,040	0,310	0,160
15—25	250	0,038	0,003	0,001	0,004	0,013	0,017	0,006	0,110	0,001	2,500	0,001
15—45	270	0,001	0,040	0,041	0,054	0,004	3,100	0,220	0,470	0,057	0,130	0,240
17—00	190	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,150	0,031	0,650	0,030	—	—
17—30	180	0,017	0,020	0,006	0,009	0,006	0,004	0,005	0,027	0,050	0,068	0,003
19—00	1800	0,001	0,008	0,002	0,001	0,017	0,002	0,040	0,060	0,080	0,310	0,300

По результатам регистрации профиля в соответствии с методикой «Точка» в штилевых условиях (4 октября 1985 г.) определены среднее значение и дисперсия температуры для каждого уровня зондирования (табл. 3). Максимальная высота зондирования составляла 350 м. Анализ данных расчета показывает, что с ростом высоты зондирования до 100 м дисперсия температуры падает, в интервале высот 100—250 м остается постоянной и с дальнейшим увеличением высоты повышается. Такой характер изменения дисперсии сохраняется и по результатам последующего зондирования. Аномальные значения дисперсии на высоте 272 м (время зондирования 20 ч 10 мин) $\sigma_T^2 = 1,35 \text{ К}^2$, на высоте 194 м (20 ч 30 мин) $\sigma_T^2 = 0,9 \text{ К}^2$ и на высоте 122 м (120 ч 50 мин) $\sigma_T^2 = 0,84 \text{ К}^2$ свидетельствуют об оседании с течением времени какого-либо турбулизованного слоя атмосферы, например, внутренних гравитационных волн.

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости дисперсии температуры от высоты, полученные с помощью методик «Трасса» (сплошная линия) и «Точка» (пунктирная). Видно, что зависимости носят различный характер: если применяется методика «Трасса», дисперсия минимальна на высоте, где согласованы длины волн электромагнитного и звукового излучений, отношение сигнал-шум максимально; при использовании методики «Точка» дисперсия температуры монотонно возрастает. Кривая зависимости дисперсии температуры от высоты при зондировании по методике «Трасса» может аппроксимироваться законом арксинуса, описывающего распределение погреш-

Время, ч	20—10			20—20			20—30			20—40			20—50		
	\bar{T} , °C	σ_T^2	N	\bar{T} , °C	σ_T^2	N	\bar{T} , °C	σ_T^2	N	\bar{T} , °C	σ_T^2	N	\bar{T} , °C	σ_T^2	N
40,8	—	—	—	18,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
54,4	20,89	1,26	2	18,9	—	1	19,25	2,14	4	19,83	—	1	—	—	—
68	20,08	1,75	15	19,93	1,35	15	19,85	1,51	9	20,54	1,75	4	21,26	1,34	11
81,6	19,61	1,0	21	19,79	0,85	21	19,46	1,03	2	19,45	0,93	22	19,41	1,2	25
95,2	20,09	0,52	24	19,84	0,65	22	19,89	1,36	23	19,58	0,43	26	20,62	1,11	22
108,8	20,10	0,52	26	19,68	0,24	25	19,64	0,52	25	19,56	0,28	26	20,04	0,43	26
122,4	19,88	0,26	26	19,57	0,14	25	19,42	0,14	25	19,55	0,14	26	19,82	0,84	26
136,0	19,84	0,2	26	19,48	0,13	25	19,44	0,13	25	19,58	0,1	26	19,76	0,17	26
149,6	19,8	0,23	26	19,42	0,15	25	19,47	0,11	25	19,7	0,1	26	19,78	0,17	26
163,2	19,72	0,24	26	19,44	0,17	25	19,5	0,15	25	19,75	0,08	26	19,76	0,16	26
176,8	19,68	0,22	26	19,47	0,13	25	19,53	0,12	25	19,77	0,1	26	19,84	0,14	26
190,4	19,61	0,17	26	19,48	0,12	25	19,5	0,9	25	19,67	0,09	26	19,72	0,11	26
204,02	19,6	0,21	26	19,41	0,13	25	19,41	0,15	25	19,63	0,09	26	19,62	0,09	26
217,61	19,42	0,16	26	19,37	0,11	25	19,32	0,16	25	19,53	0,1	26	19,55	0,12	26
231,21	19,38	0,2	26	19,35	0,11	25	19,2	0,14	25	19,36	0,1	26	19,57	0,12	26
244,81	19,29	0,22	26	19,28	0,13	25	19,25	0,16	25	19,26	0,09	26	19,51	0,12	26
258,41	19,1	0,25	26	19,27	0,21	25	19,19	0,18	25	19,2	0,15	26	19,59	0,27	26
272,01	19,01	1,35	26	19,26	0,22	25	19,10	0,23	25	19,22	0,15	26	19,21	0,41	26
285,61	18,99	0,37	25	19,2	0,36	25	19,11	0,63	23	19,14	0,15	26	18,58	1,13	25
293,21	19,11	0,6	22	19,1	0,58	25	18,81	0,62	22	19,03	0,26	26	18,7	1,58	10
312,81	18,72	0,92	21	18,68	0,55	19	18,92	1,24	10	18,83	0,46	26	20,04	—	1
326,41	18,85	1,31	16	18,37	1,5	13	18,47	1,76	8	17,99	1,65	19	—	—	—
340,01	19,35	1,57	6	18,54	1,23	4	—	—	—	17,03	1,63	3	—	—	—
353,61	—	—	—	17,39	0,39	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ностей измерения при синусоидальных процессах. Здесь это функция $(\sin x/x)^2$, характеризующая брэгговское рассеяние.

Минимальные дисперсии температуры, полученные с помощью обеих рассматриваемых методик в условиях, благоприятных для их

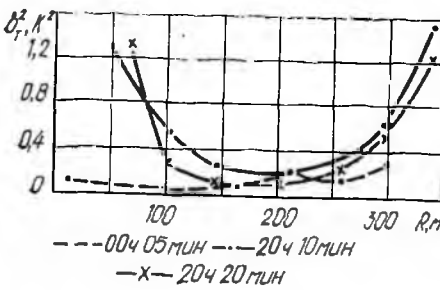


Рис. 2

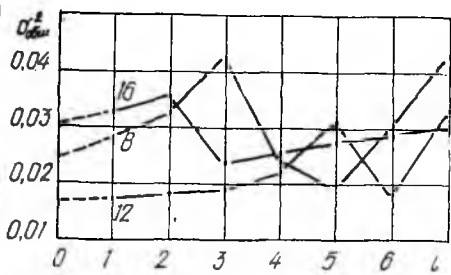


Рис. 3

применения, совпадают. Поэтому представляет интерес определение инструментальной погрешности аппаратуры РАЗ на основе экспериментальных данных. В работе [2] сделана попытка оценить погрешность измерения метеовеличин методом РАЗ, проанализировав среднеквадратичное отклонение результатов измерений метеовеличин аппарату-

рой РАЗ и метеодатчиками высотной метеомачты. Среднеквадратичные отклонения не превышают по скорости ветра $\sigma_v = 0,5 \div 1,5$ м/с, по направлению $\sigma_\varphi = 5 \div 15^\circ$, по температуре воздуха $\sigma_T = 0,2 \div 0,8$ К, при этом среднеквадратичные отклонения имели большие значения в случае повышенных скоростей ветра. Полученные результаты не в полной мере характеризуют погрешность измерения метеовеличин, в частности температуры воздуха, методом РАЗ, поскольку для проведения сравнительных измерений в целях оценки погрешностей вновь разрабатываемых средств необходимо привлекать в качестве эталонных такие средства, погрешность которых ниже погрешности проверяемых устройств в 5—10 раз, т. е. $\sigma_s = (0,1 \div 0,2) \sigma_{изм}$ [1]. Для датчика температуры высотной метеомачты $\sigma_{ТВММ} = 0,2 \div 0,3$ К, что превышает теоретически рассчитанную инструментальную погрешность измерения температуры воздуха аппаратурой РАЗ. В связи с этим погрешность измерения температуры воздуха посредством РАЗ определяли методом экстраполяции структурной функции, нередко применяемым для оценки точности метеорологических измерений [3]. Он предполагает экстраполяцию экспериментальной кривой средних квадратов разностей метеовеличин по ее ходу на известном интервале до интервала, близкого к нулю. При экстраполяции кривая $\sigma_{общ}^2(l)$, когда $\sigma_{общ}^2(l = 0)$, отсекает на оси ординат отрезок, равный удвоенному квадрату погрешности метода измерений: $\sigma_{изм}^2 = 1/2\sigma_{общ}^2$.

На рис. 3 сплошной линией показаны структурные функции пульсаций температуры, а пунктирной — результаты экстраполяции экспериментальной кривой до нуля. Для расчета структурной функции использовались данные измерения температуры на 8-м уровне (высота 122 м), на 12-м уровне (176 м) и на 16-м уровне (231 м). Погрешность измерения температуры методом РАЗ, полученная экстраполяцией структурной функции, равна соответственно 0,11; 0,09 и 0,13 К, что совпадает с инструментальной погрешностью, рассчитанной теоретически.

Методика «Точка» позволяет регистрировать вертикальные профили температуры с постоянной погрешностью до тех высот, для которых отношение сигнал-шум имеет значение не ниже 10; с уменьшением отношения сигнал-шум менее 10 погрешность начинает монотонно возрастать. Время зондирования в этом случае при усреднении 16 отсчетов на каждом уровне, высоте зондирования 340 м и разрешающей способности 13,4 м составляет около 6 мин. Необходимость перемещения акустического излучателя для компенсации сдвигающего действия ветра увеличила общее время регистрации вертикального профиля до 10 мин. Сокращение времени регистрации достигается автоматизацией управления перемещением акустического излучателя и подстройки звукового генератора, а также повышением стабильности частоты радиосигнала. Время, затрачиваемое на дистанционную регистрацию вертикального профиля температуры системой РАЗ, значительно меньше по сравнению с приведенным в работе [4]. Дополнительное сокращение времени регистрации профиля возможно с учетом того, что выше приземного слоя (75—100 м) градиент температуры

имеет значительно меньшие значения. Это и позволяет увеличить расстояние между уровнями регистрации температуры (см. рис. 1).

Использование методики «Трасса» эффективно при малых скоростях ветра и стратификации атмосферы, близкой к изотермической. Общее время регистрации вертикального профиля — одна минута. Однако для стабилизации инструментальной погрешности по всей трассе зондирования в аппаратуру аналоговой обработки принимаемых сигналов целесообразно ввести устройства, обеспечивающие постоянство напряжения доплеровской частоты на входе периодомера: автоматическая регулировка усиления, ограничение, усилитель с нелинейной характеристикой. Их отсутствие в системе РАЗ приводит к появлению большой погрешности измерения на высотах, где не выполняется условие Брэгга, что затрудняет определение температурного градиента.

В случае среднего ветра и изотермической атмосферы возможно комбинирование рассмотренных методик зондирования. Смешанная методика позволит проводить кусочную регистрацию результирующего профиля температуры.

Таким образом, в штилевых условиях и при слабом ветре (3 — 4 м/с) в зондируемом слое атмосферы целесообразно использование методики «Трасса», а если скорость ветра более 3—4 м/с — эффективнее методика «Точка». При стабилизации уровня входного напряжения периодомера (методика «Трасса») инструментальная погрешность измерения температуры для обеих методик практически равна 0,1 К.

Время регистрации вертикального профиля температуры до высоты 300—340 м составляет по методике «Трасса» 1 мин, по методике «Точка» — 10 мин.

Список литературы: 1. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. — Л.: Энергия, 1978. — 261 с. 2. Бабкин С. И., Прошкин Е. Г., Ульянов Ю. Н. Экспериментальные результаты температурно-ветрового зондирования атмосферы радиоакустическим методом // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1985. — 20, № 6. — С. 495 — 500. 3. Решетов В. Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 215 с. 4. Каллистратова М. А., Кон А. И. Современный взгляд на метод радиоакустического зондирования атмосферы // VIII Всесоюз. симп. по лазерному и акуст. зондированию атмосферы: Тез. докл. — Томск, 1984. — Ч. 2. — С. 82 — 91.

Поступила в редакцию 10.02.86