

**А. Б. Веселовская, В. А. Кабанов, А. М. Линкова,
А. В. Одновол, Т. А. Ткачева, Г. И. Хлопов, С. И. Хоменко**
Институт радиопроизводства и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: Khlopov@ire.kharkov.ua

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ОБЛАКОВ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНО-ПАССИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Измерение запаса влаги в облаках представляет значительный интерес при решении ряда практических задач, в том числе для повышения эффективности систем активного воздействия на облака, предотвращения обледенения самолетов, а также для исследования физики атмосферы. В статье анализируются возможности применения активно-пассивного метода зондирования для восстановления вертикального профиля влажности облаков с использованием измерений их радиояростной температуры и радиолокационных данных об их мощности. Приведено описание алгоритма обработки данных радиолокационных и радиометрических измерений, технические характеристики радиофизического комплекса активно-пассивного зондирования. Также приведены результаты экспериментальных исследований профиля влажности для слоистой облачности, полученные с помощью совместной обработки данных радара и радиометра на длине волны 8 мм и 3,2 см. Ил. 8. Табл. 3. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: влажность, высотный профиль влажности, водозапас, мощность облака, затухание сигналов в атмосфере.

Разработка дистанционных методов зондирования, в том числе с помощью радаров [1–4], является необходимым этапом исследования облаков на больших площадях.

Сложность физических процессов, протекающих в облаках, не позволяет однозначно характеризовать их влагузапас с помощью традиционного одночастотного радиолокационного зондирования, в связи с чем большой интерес представляют исследования по разработке активно-пассивных методов зондирования с одновременным использованием радиолокаторов и радиометров [5]. При этом возникает специфическая проблема объединения разнородных данных [6] с выходов датчиков, работающих на разных физических принципах. В связи с этим значительный интерес представляет исследование возможностей совместного использования радиолокационного и радиометрического датчиков для измерения профиля влажности облаков.

Теоретическое исследование одного из подобных методов выполнено в работах [7, 8], где приведены основные соотношения и рассмотрены особенности зондирования, а настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию описанного метода в натуральных условиях с использованием двухчастотного метеорадара и радиометра.

1. Методика измерений. Как показали экспериментальные исследования [7–9], усредненный высотный профиль влажности в облаках хорошо описывается 4-параметрической моделью в виде бета-распределения

$$\omega(z) = \omega_{\max} \frac{\xi^m (1-\xi)^p}{\xi_0^m (1-\xi_0)^p}, \text{ г/м}^3, \quad (1)$$

где $\xi = \frac{z-z_1}{h}$ – высота над основанием облака, нормированная на его толщину $h = z_2 - z_1$; ξ_0 – нормированная высота максимума ω_{\max} профиля влажности (рис. 1). Согласно данным контактных измерений, усредненные значения трех параметров для кучевых облаков лежат в следующих пределах: $\xi_0 = 0,83 \pm 0,1$, $m = 2,8 \pm 0,8$ и $p = 0,57 \pm 0,22$, в связи с чем для восстановления профиля влажности необходимо определить значение максимальной влажности ω_{\max} .

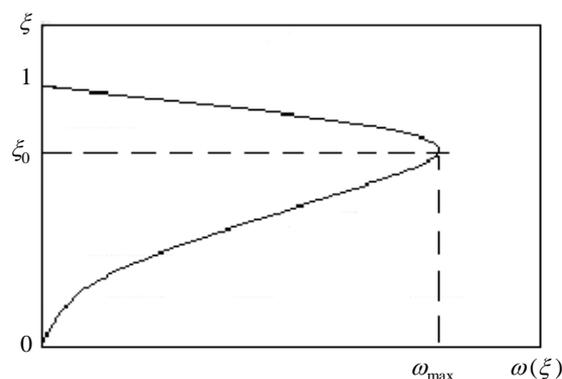


Рис. 1. Профиль влажности

Для этого можно использовать приближенное соотношение для водозапаса облака W и его яркостной температуры T_b , °К [10], которое получено с учетом затухания сигналов в газах атмосферы для диапазона $\lambda = 3,2$ см и практически не зависит от вида профиля влажности и мощности облака:

$$W = 0,1132(T_b - 5,12). \quad (2)$$

Интегрируя (1) по высоте, можно выразить водозапас $W = \int_{z_1}^{z_2} dz \omega(z)$ [11] через параметры бета-распределения:

$$W = \frac{\omega_{\max} h}{\xi_0^m (1 - \xi_0)^p} \int_0^1 d\xi \xi^m (1 - \xi)^p, \text{ кг/м}^2. \quad (3)$$

Это позволяет определить максимальную влажность профиля ω_{\max} , измеряя радиометром яркостную температуру облака T_b , а радаром – его мощность, как разность верхней и нижней границ «радиоэха» $h = (R_2 - R_1) \cos \theta$, где $R_{1,2}$ – наклонная дальность до верхней и нижней границ облака соответственно, θ – зенитный угол (рис. 2). То есть

$$\omega_{\max} = \frac{0,1132(T_b - 5,12)}{h} \frac{\xi_0^m (1 - \xi_0)^p}{\int_0^1 d\xi \xi^m (1 - \xi)^p}. \quad (4)$$

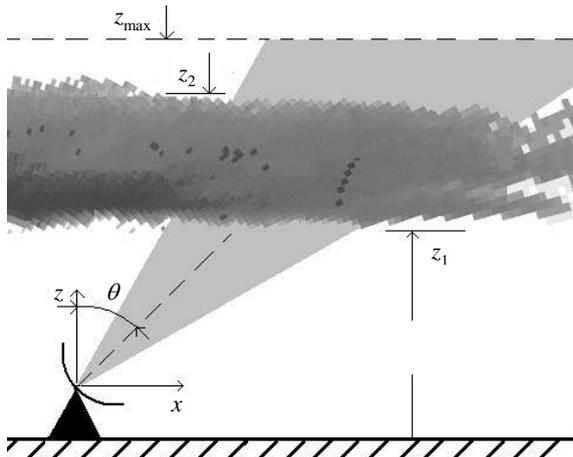


Рис. 2. Схема дистанционного зондирования

Таким образом, использование радиометрических измерений радиояркостной температуры облака и радиолокационных данных о мощности облака позволяет восстановить высотный профиль его водности.

Экспериментальные исследования проводились с помощью разработанного авторами комплекса активно-пассивного зондирования, который включает в себя модернизированный метеорадар типа МРЛ-1 [6, 12] и радиометр [13] с совмещенными антеннами (рис. 3), а также аппаратно-программный комплекс для цифровой обработки сигналов.

Антенна радиометра крепится позади основного зеркала радара, что обеспечивает высо-

кое переходное затухание между активным и пассивным каналом (не менее 140 дБ), а юстировочное устройство антенны радиометра обеспечивает совпадение осей диаграммы направленности (ДН) антенн с точностью не хуже $0,1^\circ$. Управление поворотным устройством антенн по углу места и азимуту обеспечивается с помощью аппаратно-цифрового комплекса, что позволяет сканировать пространство с учетом постоянных времени радара (0,8 с) и радиометра (5 с).

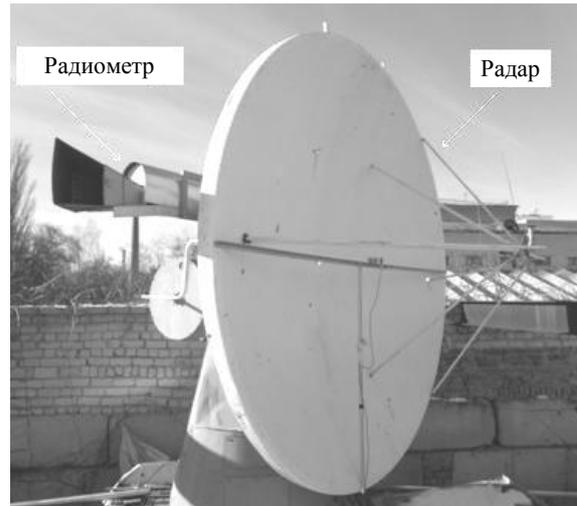


Рис. 3. Активно-пассивный измерительный комплекс на основе двухчастотного метеорадара и радиометра 3-см диапазона

Выходные сигналы радара и радиометра транслируются по кабельным линиям в пункт обработки сигналов, который содержит аппаратуру цифровой обработки сигналов для ввода и обработки информации в персональный компьютер (ПК).

Радиометр [13] работает в 3-см диапазоне и включает в себя антенну, радиометрический приемник и регистрирующее устройство. В данной работе использовалась оптимальная рупорно-параболическая антенна с раскрытием 260×220 мм, которая обеспечивает ширину ДН по уровню половинной мощности $\sim 6^\circ$ в плоскости E и $\sim 8^\circ$ в плоскости H при уровне боковых лепестков не более -27 дБ.

Радиометрический приемник выполнен по модуляционной схеме и содержит малошумящий СВЧ-усилитель, а также входные элементы для его калибровки. Особенностью структурной схемы радиометра (рис. 4) является дистанционно-управляемый аттенуатор 1 с максимальным ослаблением более 30 дБ, который управляется от блока 10, в связи с чем в закрытом состоянии аттенуатор может выполнять роль согласованной нагрузки.

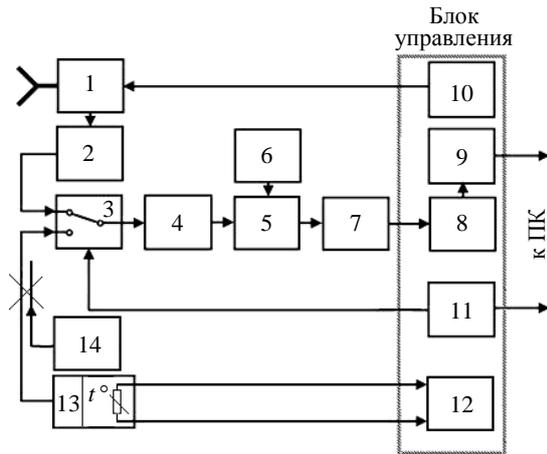


Рис. 4. Структурная схема радиометра: 1 – управляемый аттенуатор; 2 – вентиль; 3 – переключатель; 4 – СВЧ-усилитель; 5 – СВЧ-смеситель; 6 – гетеродин; 7 – предварительный усилитель промежуточной частоты; 8 – усилитель промежуточной частоты; 9 – квадратичный детектор; 10 – блок управления аттенуатором; 11 – генератор модуляционной частоты; 12 – термометр; 13 – опорная нагрузка с датчиком температуры; 14 – генератор шума

В режиме калибровки используется внешний калибровочный генератор шума 14, который реализован на основе волноводной согласованной нагрузки 13, яркостная температура которой равна ее термодинамической температуре и регулируется путем нагрева, причем температура контролируется электронным термометром 12. В рабочем режиме (при открытом аттенуаторе) переключатель 3 коммутирует вход СВЧ-усилителя 4 с частотой 20 Гц между выходом антенны и выходом опорного источника шумов. При этом последующая цифровая обработка сигнала с помощью программы *PowerGraph* обеспечивает синхронное детектирование принятых сигналов в реальном масштабе времени.

С выхода маломощного усилителя 4 сигнал поступает на СВЧ-смеситель 5, на второй вход которого подается мощность гетеродина 6, выполненного на генераторе Ганна. Сигнал промежуточной частоты $f_{пч} = 1,2$ ГГц поступает на маломощный усилитель промежуточной частоты (УПЧ) 7, 8 с полосой 30 МГц, а выходной сигнал УПЧ подается на квадратичный детектор 9 и затем на один из каналов звуковой карты ПК. На другой канал карты подается сигнал генератора модуляционной частоты 11, который обеспечивает работу переключателя каналов 3, что в дальнейшем позволяет реализовать синхронное детектирование принятого сигнала программным путем.

Конструктивно радиометрический приемник выполнен в виде двух отдельных блоков, соединенных между собой кабелем. В одном из блоков расположены СВЧ-узлы прибора и маломощный усилитель промежуточной частоты, а

во втором блоке находятся все остальные компоненты структурной схемы (рис. 4), включая блоки питания. Как показали лабораторные испытания, разработанный радиометр обладает флуктуационной чувствительностью не хуже 2°К при полосе фильтра на выходе 1 Гц.

Радиолокационное зондирование проводилось с помощью модернизированного двухчастотного радара типа МРЛ-1 [12], работающего в некогерентном режиме (рис. 5), структура которого показана на рис. 6 и включает себя: оптико-телевизионное устройство (ОТВУ) для визуального наблюдения исследуемых объектов; блок калибровки (БК) для проведения абсолютных измерений радиолокационной отражаемости в динамическом диапазоне до 45 дБ; блок управления антенной (БУА); блок сопряжения (БС) ПК.

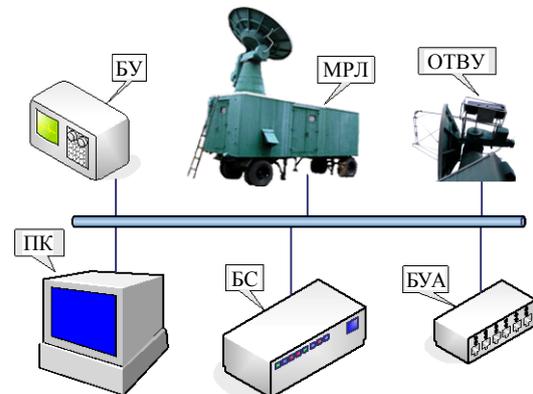


Рис. 5. Структурная схема активного канала радиофизического комплекса

Приемо-передающее устройство радара (рис. 6) состоит из двух каналов в диапазонах 8 мм и 3,2 см, которые используют общую зеркальную антенну $\varnothing 3,0$ м. В фокусе антенны расположены два рупорных облучателя с совмещенными фазовыми центрами. На выходе совмещенного облучателя используется диплексер (ДП), конструктивно совмещенный с облучателями антенны, а его плечи соединены с выходами соответствующих частотных каналов через вращающиеся сочленения (ВС) волноводов.

На входе канала 3-см диапазона установлен встроенный измеритель мощности (ИМ) проходного типа, используемый для контроля мощности магнетронного генератора (МГ). Для совместной работы приемника и передатчика на общую антенну в тракте установлен ферритовый циркулятор (ФЦ) и газовый разрядник (Р), который активируется поджигающим импульсом (ПИ). К выходу разрядника подключен направленный ответвитель (НО_1), через боковое плечо которого вводится эталонный сигнал с выхода блока калибровки, а принятый сигнал подается на маломощный усилитель (МШУ) через прямое плечо.

Направленный ответвитель (НО₂) и аттенуатор (АТ) обеспечивают работу системы автоматической подстройки частоты (АПЧ), а смесители каналов сигнала (СМ_{сиг}) и АПЧ (СМ_{АПЧ}) питаются от общего гетеродина на базе клистронного генератора (КГ), частота которого управляется из блока АПЧ. Сигналы с выхода усилителя промежуточной частоты (УПЧ) канала сигнала подаются на вход видеоусилителя (ВУ), расположенного в блоке управления и индикации.

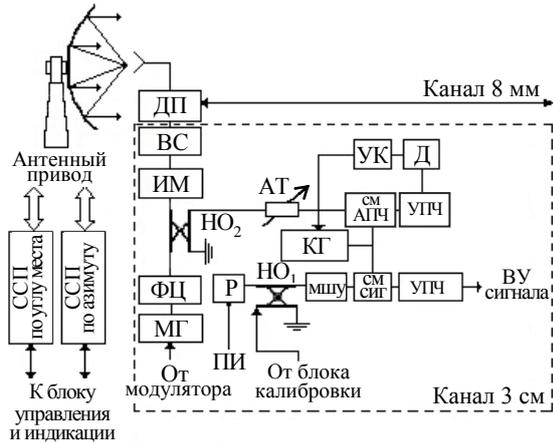


Рис. 6. Структурная схема радара

Для контроля частоты клистронного генератора сигналы с выхода УПЧ канала АПЧ подаются на дискриминатор (Д), выход которого определяет режим работы управляющего каскада (УК), что позволяет подстраивать частоту гетеродина по сигналу магнетрона.

Структурная схема канала 8 мм практически не отличается от описанной выше и обеспечивает прием и передачу сигналов миллиметрового диапазона с помощью общей антенны, а параметры приемо-передающего устройства обоих диапазонов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры приемо-передающего устройства

Параметр	Канал 3 см	Канал 8 мм
Импульсная мощность, кВт	250	50
Длительность импульса, мкс	0,5	0,5
Частота повторения, Гц	600	600
Предельная чувствительность, дБ/Вт	-132	-115
Полоса пропускания, МГц	2,0	2,0
Линейный динамический диапазон, дБ	45	45
Коэффициент усиления антенны, дБ	46	58
Диаметр антенны, м	3,0	3,0
Уровень боковых лепестков, дБ	-21	-23
Ширина луча антенны по уровню -3 дБ, град	0,75	0,3
Энергетический потенциал, дБ	215	210

Управление положением антенны по азимуту и углу места осуществляется по заданной программе с помощью синхронно-следящего привода (ССП), а для визуального наблюдения исследуемых метеорологических объектов на механическом приводе антенны закреплено ОТВУ, оптическая ось которого совмещена с электрической осью антенны.

2. Результаты экспериментального исследования облаков. Активно-пассивное зондирование облаков проводилось в 2014–2016 гг. с использованием описанных выше двухчастотного радара и радиометра, а обработка результатов измерений осуществлялась в соответствии с разработанной выше методикой. Радиолокационная отражаемость облаков существенно зависит от рабочего диапазона длин волн, в связи с чем результаты радиолокационного зондирования могут отличаться в зависимости от выбранного диапазона. Поэтому измерения проводились одновременно в двух диапазонах длин волн 8 мм и 3,2 см для слоистой облачности; типичные радиолокационные изображения в указанных диапазонах приведены на рис. 7, а и б соответственно.

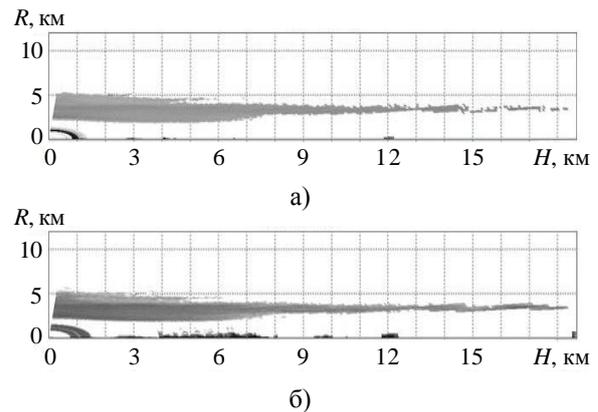


Рис. 7. Радиолокационное изображение исследуемой облачности: а) канал 8 мм; б) канал 3 см

При этом следует отметить, что изображение 8-мм канала отличается несколько большей детальностью, хотя энергетический потенциал канала 3-см диапазона превышает соответствующее значение для 8-мм канала. Однако более информативным является сравнение числовых данных радиолокационного зондирования, в связи с чем в процессе измерений производилось вычисление следующих величин: водозапас W , $\text{кг}/\text{м}^2$; средняя водность $\bar{\omega} = W/h$, $\text{г}/\text{м}^3$; максимальная водность ω_{max} , $\text{г}/\text{м}^3$; высота максимальной водности z_0 , км; мощность облака h , км; температура у поверхности земли T_0 , °C; радиояростная температура облака с учетом вклада атмосферы T_b , °K.

Как показали измерения, высотный профиль сигналов, отраженных от облака, в значительной мере неоднороден, что затрудняет определение мощности облака. Поэтому для ее оценки вычислялось эффективное значение толщины облака в виде отношения ширины высотного профиля отраженной мощности и его максимального значения, вычисленных с учетом фактора пространственного ослабления R^{-4} и пересчитанных в терминах наклонной дальности,

$$h_{ef} = \frac{\cos \theta}{P_R^{\max}} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} P_R(R) dR, \quad (5)$$

где $P_R(R)$ – зависимость принятой мощности от дальности для данного зенитного угла θ ; P_R^{\max} – максимальное значение отраженного сигнала; $R_{\min} = 450$ м – минимальная наклонная дальность на границе «мертвой зоны»; $R_{\max} = N\Delta R = 18,75$ км – максимальная наклонная дальность, которая определяется количеством обрабатываемых ячеек дальности ($N = 250$) и разрешающей способностью радара по дальности ($\Delta R = 75$ м).

Результаты вычислений представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Данные зондирования облаков с учетом затухания в атмосфере

Зенитный угол, θ , °	Длина волны, см	Водозапас, W , кг/м ²	Средняя влажность, г/м ³	Максимальная влажность, ω_{\max} , г/м ³	Высота максимальной влажности, км	Яркостная температура T_b , °К (3,2 см)	Эффективная мощность облака, h_{ef} , км
70	3,2	0,465	0,912	2,012	2,863	15,67	0,509
60	3,2	0,59	1,231	2,717	3,098	12,96	0,479
	0,8	0,564	0,91	2,0	3,4		0,619
50	3,2	0,653	1,414	3,105	3,563	11,53	0,462
	0,8	0,631	1,393	3,056	3,746		0,453
0	3,2	0,63	1,17	2,58	4,036	7,83	0,537
	0,8	0,62	0,94	2,063	4,22		0,661
30	3,2	1,088	2,298	5,043	3,383	12,5	0,474
0	3,2	1,24	1,755	3,859	2,987	11,27	0,707
	0,8	1,208	1,297	2,853	3,243		0,931
30	3,2	1,257	0,945	2,081	2,464	11,83	1,329
30	3,2	0,433	0,649	1,427	5,684	9,94	0,668
0	3,2	0,445	0,746	1,64	5,51	8,61	0,597
	0,8	0,434	0,552	1,214	5,742		0,785
30	3,2	1,29	1,926	4,245	2,176	13,22	0,669

Таблица 3

Данные зондирования облаков без учета затухания в атмосфере

Зенитный угол, θ , °	Длина волны, см	Водозапас, W , кг/м ²	Средняя влажность, г/м ³	Максимальная влажность, ω_{\max} , г/м ³	Высота максимальной влажности, км	Яркостная температура T_b , °К (3,2 см)	Эффективная мощность облака, h_{ef} , км
70	3,2	0,763	1,498	3,304	2,863	15,67	0,509
60	3,2	0,875	1,825	4,027	3,098	12,96	0,479
	0,8	0,836	1,349	2,965	3,4		0,619
50	3,2	0,915	1,979	4,389	3,563	11,53	0,462
	0,8	0,884	1,949	4,336	3,746		0,453
0	3,2	0,87	1,62	3,56	4,036	7,83	0,537
	0,8	0,85	1,29	2,84	4,22		0,661
30	3,2	1,352	2,854	6,346	3,383	12,5	0,474
0	3,2	1,528	2,161	4,753	2,987	11,27	0,707
	0,8	1,488	1,598	3,521	3,243		0,931
30	3,2	1,583	1,19	2,619	2,464	11,83	1,329
30	3,2	0,572	0,856	1,885	5,684	9,94	0,668
0	3,2	0,589	0,986	2,168	5,51	8,61	0,597
	0,8	0,574	0,73	1,617	5,742		0,785
30	3,2	1,57	2,351	5,18	2,176	13,22	0,669

В результате, как оказалось, толщина облака, измеренная в диапазоне $\lambda = 8$ мм, всегда больше в среднем на 150 м, чем в диапазоне $\lambda = 3$ см, что, впрочем, может быть объяснено более высокой чувствительностью 8-мм канала к мелким атмосферным частицам, которые составляют основную долю верхней и нижней пограничных частей облака.

Также следует отметить, что значения водозапаса облаков (столбец 3), измеренные в 3-см диапазоне и в диапазоне 8 мм, отличаются весьма незначительно (не более 3,5 %), хотя значение водозапаса, измеренное в 3-см диапазоне, всегда больше, чем в 8-мм диапазоне.

Важным параметром для практических приложений является средняя водность облака (столбец 4), которая в значительной мере определяет его пригодность для активного воздействия путем распыления химических реагентов [1]. Как оказалось, в рассматриваемом случае результаты измерения средней водности в 3-см диапазоне всегда превышают соответствующие значения в 8-мм диапазоне примерно на 25 %, что может быть обусловлено не только различием в измеренной мощности облака, но и разным затуханием сигналов 8-мм и 3-см диапазонов в облаке. Поэтому наиболее существенная часть жидкокапельной влаги, сосредоточенная в области максимума водности, в определенном смысле «экранируется» нижними слоями облака.

Это подтверждается также расчетами максимальной водности (столбец 5), результаты измерения которой в 3-см диапазоне заметно превышают (на 22 %) соответствующие значения максимальной водности в 8-мм диапазоне.

Представляет интерес сравнение результатов обработки экспериментальных данных, рассчитанных с учетом (табл. 2) и без учета (табл. 3) затухания сигналов в атмосфере. Как показывает анализ, все измеренные величины (водозапас, средняя и максимальная водность), рассчитанные без учета затухания в атмосфере на 25–30 % превышают соответствующие величины, вычисленные с учетом затухания. Это объясняется пренебрежением дополнительным затуханием в атмосферных газах, которое в данном случае трансформируется в дополнительное затухание в облаках за счет несуществующей влаги.

При сравнении результатов восстановления высотного профиля водности (1), примеры которых приведены на рис. 8, заметно, что профиль водности, измеренный с помощью радиометра и радара для 3-см диапазона (рис. 8, а, сплошная кривая), заметно отличается от соответствующих данных при использовании радара 8-мм диапазона (рис. 8, а, пунктирная кривая) за счет затухания 8-мм сигналов при измерении верхней границы облачности. При этом необхо-

димо отметить факт незначительного (порядка 100...150 м) превышения оценки нижней границы профиля водности, измеренной в 8-мм диапазоне, по сравнению с данными, полученными с использованием радара 3-см диапазона. В этой связи значительный интерес представляет проведение экспериментов по сравнению данных дистанционного зондирования с результатами контактных измерений (например, с помощью шара-зонда), несмотря на значительные трудности при организации подобных исследований.

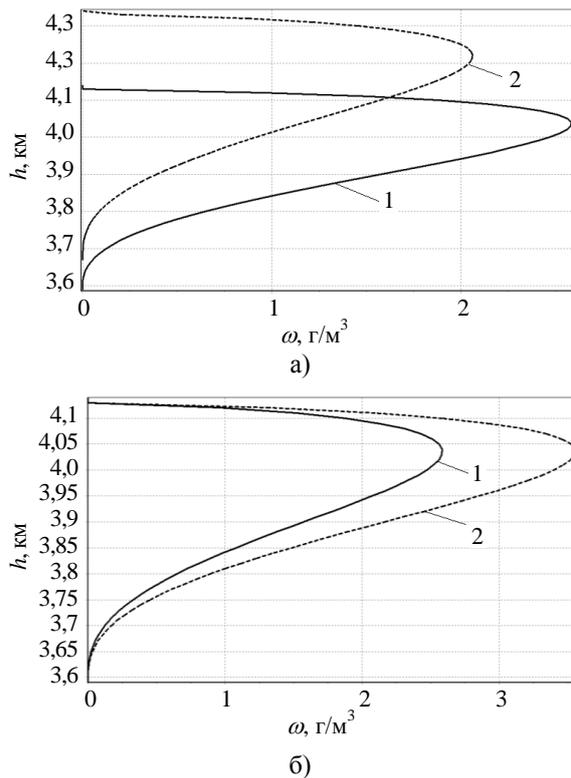


Рис. 8. Сравнение высотных профилей водности, рассчитанных с использованием данных радара на длинах волн 3 см (кривая 1) и 8 мм (кривая 2): а) с учетом ослабления в атмосферных газах; б) без учета ослабления в атмосферных газах

Кроме того, несмотря на малое затухание сигналов в газах атмосферы, его влияние на результаты зондирования весьма ощутимо. Например, на рис. 8, б приведен вариант высотного профиля водности облака, полученного с учетом затухания в атмосфере (сплошная кривая) и без его учета (пунктирная кривая). Несмотря на совпадение нижней и верхней границ профиля, максимумы водности заметно отличаются, как это следует из данных, приведенных в табл. 2 и 3 (столбцы 5), что подчеркивает необходимость учета ослабления сигналов в газах атмосферы.

Выводы. В данной работе приведено описание разработанного радиофизического комплекса для активно-пассивного зондирования водности облаков, который состоит из двухчастотного не-

когерентного радара в 8-мм и 3-см диапазонах радиоволн, а также радиометра в диапазоне 3 см. Особенностью комплекса является совмещенные ДН антенн активного и пассивного каналов при высоком переходном затухании между ними (≥ 140 дБ). Комплекс оборудован цифровой системой обработки сигналов с выходов обоих каналов и включает в себя программный продукт для обработки результатов измерений.

Проведены экспериментальные исследования слоистой облачности по восстановлению высотного профиля водности. Результаты измерений позволяют сделать следующие выводы:

- мощность облака, измеренная в диапазоне $\lambda = 8$ мм, всегда больше в среднем на 150 м, чем мощность в диапазоне $\lambda = 3$ см, что объясняется более высокой чувствительностью радиолокационного канала 8-мм диапазона к мелким частицам облака, концентрация которых на верхней и нижней границах облака существенно падает;
- значения водозапаса облаков, измеренные в 3-см диапазоне, незначительно отличаются от соответствующих величин, измеренных в диапазоне 8 мм (не более 3,5 %);
- средняя водность облака, измеренная в 3-см диапазоне, всегда превышает соответствующие значения в 8-мм диапазоне примерно на 25 %, что объясняется различием в измеренной мощности облака и разным затуханием сигналов 8-мм и 3-см диапазонов;
- значения максимальной водности, измеренные в 3-см диапазоне, заметно превышают (на 22 %) соответствующие значения максимальной водности, измеренные в 8-мм диапазоне.

Сравнение результатов обработки экспериментальных данных с учетом и без учета затухания сигналов в атмосфере показывает, что расчеты водозапаса, средней и максимальной водности без учета затухания в атмосфере на 25...30 % превышают соответствующие величины, вычисленные с учетом затухания. Это обстоятельство указывает на необходимость учета затухания сигналов в газах атмосферы.

Профиль водности, измеренный с помощью радиометра и радара для 3-см диапазона, отличается от соответствующих данных при использовании радара 8-мм диапазона, причем нижняя граница профиля водности, измеренная в 8-мм диапазоне, незначительно (на 100...150 м) превышает оценки, полученные с использованием 3-см радара.

Библиографический список

1. Силаев А. В., Баханов В. П., Баханова Р. А., Иванченко Л. В., Мирмович Л. О. Проблемы фізики хмар і активних впливів на метеорологічні процеси. К.: Наук. думка, 2004. 352 с.
2. Баранов А. М. Облака и безопасность полетов. Ленинград: Гидрометеоздат, 1983. 232 с.

3. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеоздат, 2000. 780 с.
4. Степаненко В. Д. Радиолокация и метеорология. Ленинград: Гидрометеоздат, 1966. 327 с.
5. Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Ильин Я. К. Методические вопросы и некоторые результаты зондирования конвективных облаков с помощью пассивно-активной радиолокационной станции. Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 1985. Вып. 490. С. 80–92.
6. Белов Е. Н., Войтович О. А., Линкова А. М., Руднев Г. А., Хлопов Г. И., Хоменко С. И. Двухчастотное зондирование жидких осадков с помощью метеорадара МРЛ-1. Радиофизика и электроника. 2012. Т. 3(17), № 1. С. 49–59.
7. Белов Е. Н., Войтович О. А., Кабанов В. А., Линкова А. М., Руднев Г. А., Ткачева Т. А., Хлопов Г. И., Хоменко С. И. Применение активно-пассивного зондирования для исследования профиля водности облаков. Радиотехника. 2013. № 174. С. 32–42.
8. Белов Е. Н., Войтович О. А., Кабанов В. А., Линкова А. М., Ткачева Т. А., Хлопов Г. И., Хоменко С. И. Активно-пассивное зондирование облаков для восстановления профиля водности. 23-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 8–14 сентября 2013. Севастополь, Крым, Украина. С. 1126–1127.
9. Войт Ф. Я., Мазин И. И. Водность кучевых облаков. Физика атмосферы и океана. Т. 8, № 11. 1979. С. 1166–1176.
10. Kabanov V. A., Khomenko S. I., Khlopov G. I., Linkova A. M., Tkachova T. A., Schuenemann K., Voitovych O. A. Algorithm for the Retrieval of Liquid Water Content Profile of Clouds by Active and Passive Remote Sensing. J. Earth Science Research. 2015. Vol. 3, Iss. 2. P. 13–22.
11. Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Ленинград: Гидрометеоздат, 1987. 283 с.
12. Belov Ye. N., Voytovich O. A., Makulina T. A., Rudnev G. A., Khlopov G. I., Khomenko S. I. Software and hardware complex for investigation of meteorological radar echo. Telecommunications and radioengineering. 2010. Vol. 69, N 17. P. 1517–1527.
13. Кабанов В. А. Радиометр для метеорологических измерений с точной калибровкой по яркостной температуре неба. Радиофизика и электроника. 2016. Т. 7(21), № 3. С. 11–17.

REFERENCES

1. SILAEV, A. V., BAHANOV, V. P., BAHANOVA, R. A., IVANCHENKO, L. V., MIRMOVICH, L. O., 2004. *Problems of cloud physics and active effects on meteorological processes*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Ukrainian).
2. BARANOV, A. M., 1983. *Clouds and flight safety*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
3. MATVEEV, L. T., 2000. *Physics of atmosphere*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
4. STEPANENKO, V. D., 1966. *Radiolocation and meteorology*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
5. SHCHUKIN, G. G., BOBYLEV, L. P., ILYIN, Ya. K., 1985. Methodological issues and some results of probing convective clouds with the help of a passively active radar station. *Works of Voeikov Main Geophysical Observatory*. Vol. 490, pp. 80–92 (in Russian).
6. BELOV, Ye. N., VOYTOVICH, O. A., LINKOVA, A. M., RUDNEV, G. A., KHLOPOV, G. I., KHOMENKO, S. I., 2012. Two-frequency sounding of liquid precipitation with the help of MRL-1 meteoradar. *Radiophysics and Electronics*. Vol. 3(17), no. 1, pp. 49–59 (in Russian).
7. BELOV, Ye. N., VOYTOVICH, O. A., KABANOV, V. A., LINKOVA, A. M., RUDNEV, G. A., TKACHOVA, T. A., KHLOPOV, G. I., KHOMENKO, S. I., 2013. Application of active-passive sounding to study the profile of the water content of clouds. *Radio engineering*. No. 174, pp. 32–42 (in Russian).

8. BELOV, Ye. N., VOYTOVICH, O. A., KABANOV, V. A., LINKOVA, A. M., TKACHOVA, T. A., KHLOPOV, G. I., KHOMENKO, S. I., 2013. Active-passive sounding of clouds to restore the water content profile. In: 23rd Int. Crimean conf. "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies". Sevastopol, Ukraine. Sept. 8–14. Pp. 1126–1127 (in Russian).
9. VOYT, F. Ya., MAZIN, I. I., 1979. Water content of cumulus clouds. *Atmosphere and ocean physics*. Vol. 8, no. 11, pp. 1166–1176 (in Russian).
10. KABANOV, V. A., KHOMENKO, S. I., KHLOPOV, G. I., LINKOVA, A. M., TKACHOVA, T. A., SCHUENEMANN, K., VOYTOVICH, O. A., 2015. Algorithm for the Retrieval of Liquid Water Content Profile of Clouds by Active and Passive Remote Sensing. *J. Earth Science Research*. Vol. 3, Iss. 2, pp. 13–22.
11. STEPANENKO, V. D., SHUKIN, G. G., BOBYLEV, L. P., MATROSOV, S. Yu., 1987. *Radioteplotation in meteorology*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
12. BELOV, Ye. N., VOYTOVICH, O. A., MAKULINA, T. A., RUDNEV, G. A., KHLOPOV, G. I., KHOMENKO, S. I., 2010. Software and hardware complex for investigation of meteorological radar echo. *Telecommunications and Radio-engineering*. Vol. 69, no. 17, pp. 1517–1527.
13. KABANOV, V. A., 2016. Radiometer for meteorological measurements with accurate calibration according to the brightness temperature of the sky. *Radiophysics and Electronics*. Vol. 21, no. 3, pp. 11–17.

Рукопись поступила 15.05.2017.

A. B. Veselovskaya, V. A. Kabanov, A. M. Linkova,
A. V. Odnovol, T. A. Tkachova, G. I. Khlopov,
S. I. Khomenko

RECOVERING THE VERTICAL CLOUD PROFILE USING ACTIVE-PASSIVE SENSING

The research regarding the liquid water content of clouds is quite important for the study of physical processes in the

atmosphere, and development of ice protection system. The paper analyzes the possibilities of using the active-passive sounding method to restore the vertical profile of cloudiness with the use of measurements of its radio brightness temperature and radar data on its power. A description of the algorithm for processing radar and radiometric data, and the technical characteristics of the radiophysical active-passive sounding system is given. Also, the results of experimental studies of the water content profile for layered clouds obtained by the joint processing of radar and radiometer data at a wavelength of 3.2 cm and 0.8 cm are presented.

Key words: water content, altitude water profile, cloud power, attenuation of signals in the atmosphere.

Г. Б. Веселовська, В. О. Кабанов, А. М. Лінкова,
А. В. Одновол, Т. О. Ткачова, Г. І. Хлопов,
С. І. Хоменко

ВІДНОВЛЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ ХМАР ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВНО- ПАСИВНОГО ЗОНДУВАННЯ

Вимірювання об'єму вологи у хмарах являє значний інтерес для розв'язання ряду практичних задач, у тому числі для підвищення ефективності систем активної дії на хмари, запобігання обмерзанню літаків, а також для дослідження фізики атмосфери. У роботі аналізуються можливості застосування активно-пасивного методу зондування для відновлення вертикального профілю водності хмар з використанням вимірювань їх радіярккісної температури та радіолокаційних даних про їх потужність. Наведено опис алгоритму обробки даних радіолокаційних та радіометричних вимірювань, технічні характеристики радіофізичного комплексу активно-пасивного зондування. Також надано результати експериментальних досліджень профілю водності для шаруватих хмар, що були отримані з допомогою сумісної обробки даних радара та радіометра на довжині хвилі 8 мм та 3,2 см.

Ключові слова: водність, висотний профіль водності, водозапас, потужність хмар, загасання сигналів у атмосфері.