

## **Применение методов радиотеплолокации для исследования содержания жидкокапельной влаги в облаках и туманах**

Д.М. Караваев<sup>1</sup>, Г.Г. Щукин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,  
197198, г. Санкт-Петербург, Ждановская улица, 13.

E-mail: [yka@mil.ru](mailto:yka@mil.ru)

<sup>2</sup> АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», 106234, г. Санкт-Петербург, Кожевенный пер., д.41.

*Обсуждаются вопросы применения метода радиотеплолокации для исследования характеристик облаков и туманов в прикладных задачах физики облаков. Представлены некоторые результаты радиотеплолокационных исследований характеристик влагосодержания атмосферы, водозапаса конвективных, слоистообразных облаков и туманов. Ключевые слова: СВЧ- радиометр, водозапас облаков, влагозапас атмосферы, конвективные облака, слоистообразные облака, туманы.*

## **Application of the microwave radiometry for investigation of liquid water contents in clouds and fogs**

D.M. Karavaev<sup>1</sup>, G.G. Shchukin<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Mozhaisky Military Aerospace Academy.

<sup>2</sup> State Research navigation-hydrographic Institute.

*The issues of applying the microwave radiometric method to study the characteristics of clouds and fogs in applied problems of cloud physics are discussed. Some results of microwave radiometric studies of the characteristics of atmospheric moisture content and liquid water in convective, stratiform clouds and fogs are presented.*

*Keywords: microwave radiometer, cloud liquid water content, atmospheric water vapor, convective clouds, stratiform clouds, fogs.*

## **Введение**

Методы и средства радиотеплолокации применяются в прикладной метеорологии для влажностного и температурного зондирования атмосферы, позволяют определять характеристики влагосодержания атмосферы, содержание жидкокапельной влаги в облаках [1-4], - что имеет значение для физики облаков, апробации моделей атмосферы, совершенствования методов контроля параметров атмосферы и характеристик облаков. Целью работы ставится обобщение результатов комплексных исследований характеристик влагосодержания атмосферы, в том числе, содержания жидкокапельной влаги в конвективных, слоистообразных облаках и туманах, а также влагозапаса атмосферы по данным радиотеплолокационных измерений.

## **Методические вопросы применения метода радиотеплолокации**

Метод наземной радиотеплолокации (СВЧ-радиометрии) эффективен для исследования содержания жидкокапельной влаги в облаках. Наиболее информативные участки спектра радиотеплового излучения находятся в «окнах» прозрачности

атмосферы при частотах 30 - 37 ГГц, 75 - 95 ГГц, 140 -160 ГГц, а также в области малого поглощения излучения 5-15 ГГц. В безоблачной атмосфере поглощение микроволнового излучения происходит в основном в кислороде и водяном паре, при этом линии поглощения в кислороде центрированы при частотах 118 и 60 ГГц, а линии поглощения водяного пара - при частотах 22.235 и 183.16 ГГц.

Используемая часто на практике исходная линейная модель определяет интегральное поглощение облачной атмосферы (при отсутствии осадков) в виде суммы слагаемых, определяющих поглощение кислородом, водяным паром атмосферы и жидкокапельными облаками [1,4]:

$$\tau(f) = \tau_{O_2}(f) + a_q(f)Q + \psi(f, T_{эф обл}) W, \quad (1)$$

где  $\tau(f)$  - полное поглощение (оптическая толщина атмосферы);  $\psi(f, T_{эф обл})$  - эффективный удельный коэффициент поглощения в жидкокапельных облаках;  $T_{эф обл}$  - эффективная температура капельных облаков;  $a_q(f)$  - эффективный удельный коэффициент поглощения в водяном паре;  $\tau_{O_2}(f)$  - поглощение в кислороде;  $Q$  - влагозапас атмосферы;  $W$  - водозапас облаков.

На основе применения (1) рассматриваются следующие задачи: а) определение водозапаса облаков (содержания жидкокапельной части интегральной водности в облаках), б) раздельного определения содержания водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы (содержания парообразной влаги в атмосфере), с) определение влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и средней температуры облаков.

При зондировании конвективных облаков используется метод определения водозапаса облаков, основанный на соотношении:

$$W = [\tau(f) - \tau_{O_2}(f) + a_q(f)Q] \psi(f, T_{эф обл})^{-1}. \quad (2)$$

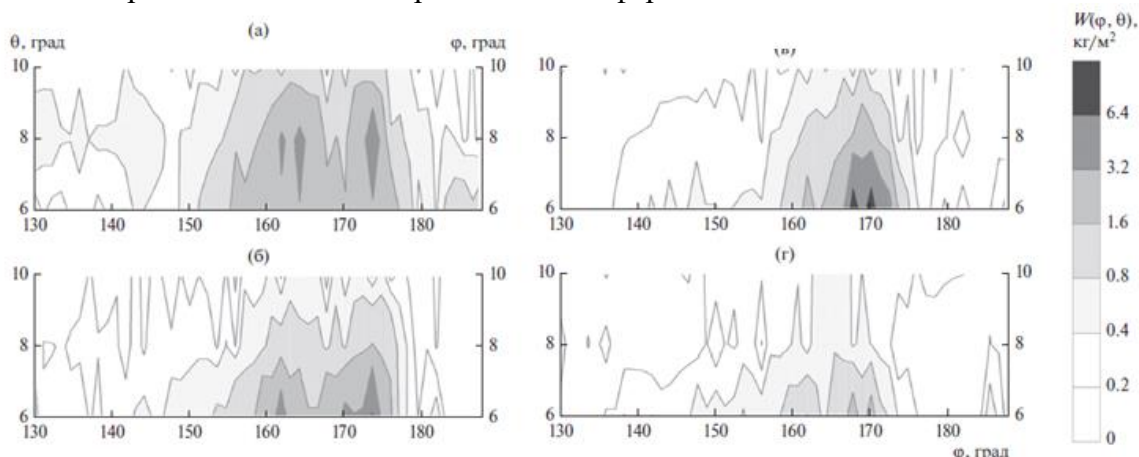
Обычно в (2) используется априорная информация о  $Q$  и климатические модельные данные о  $\tau_{O_2}(f)$ . Решается задача определения водозапаса облаков по лучу антенны из результатов радиотеплолокационных измерений на одной, двух или нескольких частотах в окнах прозрачности атмосферы и/или области низкого ослабления. При исследовании конвективных облаков на различных стадиях их развития (Cu hum, Cu med, Cu cong, Cb) информативные участки спектра радиотеплового излучения находятся при частотах 75-95, 30-37, 5-15 ГГц, соответственно. При небольших значениях водозапаса менее 2 кг/м<sup>2</sup>, что соответствует облакам Cu hum, Cu med радиояркий контраст максимален в окне прозрачности 75-95 ГГц, а при водозапасах более 2 кг/м<sup>2</sup> – вблизи длины волны 1 см. Для определения водозапаса конвективных облаков нужно использовать линейный участок зависимости радиояркого контраста от водозапаса облаков  $W$ , не попадая в область насыщения. Использование длинноволнового участка диапазона частот предпочтительно для исследования Cb (с водозапасом до 30 кг/м<sup>2</sup>) с осадками. Погрешность определения водозапаса конвективных облаков оценивается величиной около 20-40 %. Однако, при наличии крупных капель в облаках Cb дополнительные погрешности могут быть связаны с эффектами рассеяния.

В экспериментах отработана методика исследований конвективных облаков, которая состояла в получении последовательности радиотепловых карт переохлажденной части конвективных облаков при проведении сканирования по азимуту и углу места и определении водозапаса облака по направлению луча антенны. При этом, как правило использовалась малошумящая двухзеркальная антенна Кассегрена с угловым разрешением менее 0.4-1 градуса. На рис. 1а-1г приведены результаты СВЧ-радиометрического зондирования мощного конвективного облака и определения водозапаса облака  $W(\varphi, \theta)$ , где  $\varphi$  - азимут,  $\theta$  - угол места антенны.

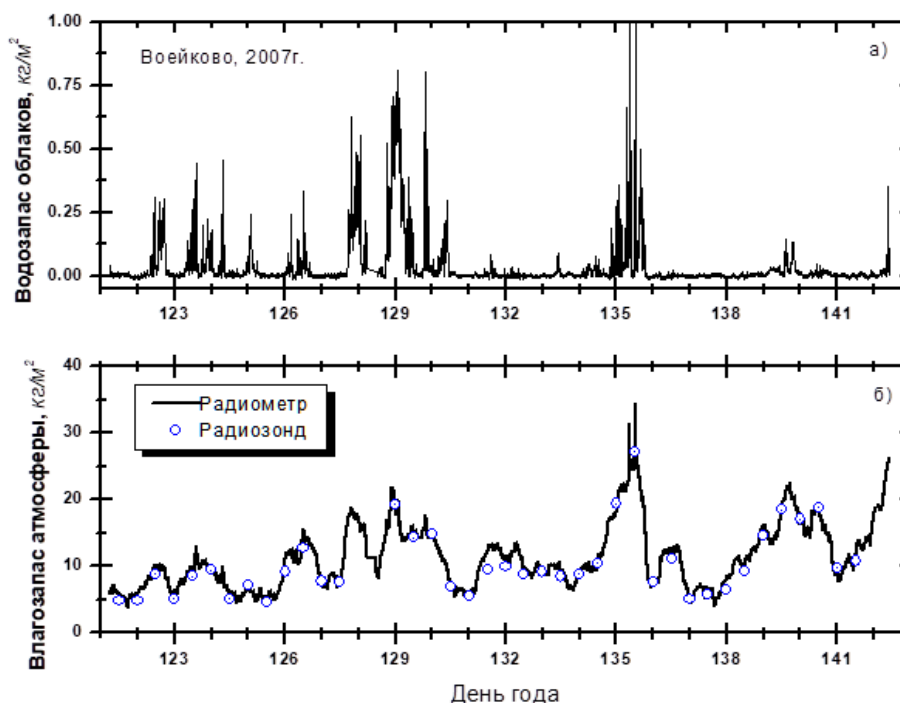
Для атмосферы, содержащей слоистообразные облака, водозапас облаков и влагозапас атмосферы определяются из уравнений [1,4]:

$$\begin{cases} Q = a_0 + a_1\tau(f_1) + a_2\tau(f_2) \\ W = b_0 + b_1\tau(f_1) + b_2(f_2) \end{cases}, \quad [3]$$

где  $a_i, b_i$  - коэффициенты регрессии, полученные по данным радиозондирования атмосферы и эмпирическим моделям облачности. Обычно используется методика измерений радиоярких температур при двух частотах (около 20,7 и 36,5 ГГц) при фиксированном угле места (например, в зенитном направлении). Угловое разрешение составляет около 6-9 градусов. Погрешность определения водозапаса облаков составляет около 30%. Пример радиотеплолокационных измерений водозапаса атмосферы и водозапаса облаков приведен на рис.2. Данные по влагозапасу атмосферы согласуются с данными аэрологического зондирования атмосферы.



**Рис. 1. Распределение водозапаса конвективного облака:**  
а) - 18 ч 42 м, б) - 18 ч 49 м, в) - 18 ч 56 м, г) - 19 ч 02 м



**Рис. 2. Пример временного хода водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы в зените, пос. Воейково (Ленинградская обл.)**

В таблице 1 приведены результаты сравнения радиотеплолокационных измерений водозапаса облаков с данными эмпирических моделей облаков [5].

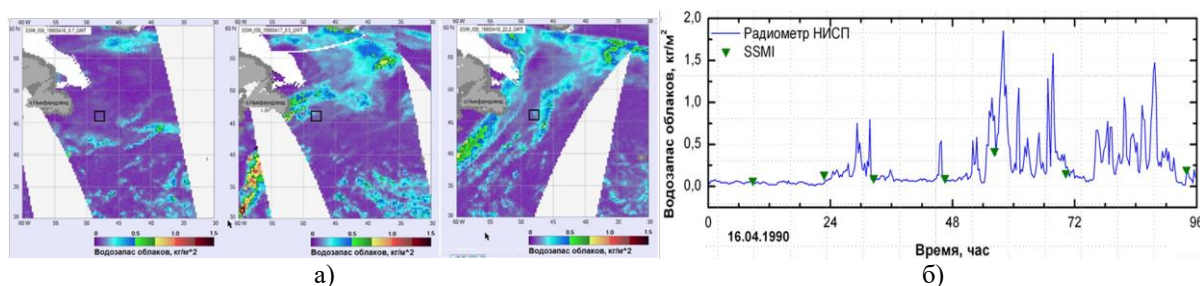
**Таблица 1. Влагозапас атмосферы и водозапас различных типов облаков по радиометрическим данным (числитель), модели (знаменатель)**

Тип облаков, период	Влагозапас атмосферы		Водозапас облаков	
	СЗ, кг/м <sup>2</sup>	СКО, кг/м <sup>2</sup>	СЗ, кг/м <sup>2</sup>	СКО, кг/м <sup>2</sup>
<b>Октябрь</b>				
Ac	10.10 / 12.10	3.09 / 6.90	0.029 / 0.05	0.014 / 0.03
Sc, St	13.75 / 13.92	4.30 / 5.83	0.137 / 0.10	0.074 / 0.03
Ns	21.88 / 18.0	7.69 / 6.40	0.350 / 0.58	0.201 / 0.34
<b>Январь</b>				
Ac	7.36 / 6.18	2.12 / 0.04	0.023 / 0.04	0.023 / 0.03
Sc, St	9.67 / 2.29	3.58 / 0.08	0.093 / 0.08	0.066 / 0.03
Ns	10.65 / -	3.96 / -	0.113 / -	0.073 / -

Трехпараметрическая задача определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и эффективной температуры облаков рассмотрена в [1]. Использование диапазона 75-95 ГГц дает дополнительные возможности по исследованию облаков с низким содержанием жидкокапельной влаги и позволяет повысить точность определения водозапаса облаков. Двухчастотный метод радиометрического зондирования облаков при частотах 37 и 94 ГГц был реализован в работе [6].

Задача комплексного определения профилей температуры, влажности, водности облаков в тропосфере решается по данным многочастотного зондирования атмосферы в диапазоне частот от 22 до 90 ГГц. Спектральный диапазон частот около центра линии H<sub>2</sub>O 22.235 ГГц (22-32 ГГц) используется для влажностного зондирования атмосферы, диапазон частот около центра линии O<sub>2</sub> 60 ГГц (51-58 ГГц) используется для температурного зондирования, измерения в окнах прозрачности 31-37 ГГц и 75-95 ГГц используются для зондирования облаков. Погрешность определения температуры воздуха в тропосфере составляет около 0.5-2 К. Погрешность определения абсолютной влажности воздуха в тропосфере составляет 10-20 %. Погрешность определения влагозапаса атмосферы около 0.5-1 кг/м<sup>2</sup>, а водозапаса облаков около 0.03-0.05 кг/м<sup>2</sup>.

В настоящее время спутниковые СВЧ-радиометры широко применяются для оснащения оперативных и научно-исследовательских космических аппаратов гидрометеорологического и океанографического назначения [7]. Например, для определения водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы, а также получения других информационных продуктов применяются следующие СВЧ-радиометры: MWI на американских КА WSF-M1, ATMS на КА NOAA-21, AMSR-3 на японских КА GOSAT-GN; МТВЗА-ГЯ на отечественном КА «Метеор-М». Информативность определения водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы существенно зависит от типа подстилающей поверхности, а лучшие результаты восстановления параметров получаются при зондировании над водной поверхностью [8].



**Рис.3. Водозапас облаков: а) - спутниковые данные; б) - данные судового радиометра**

В качестве примера на рис.3а представлены карты водозапаса облаков, полученные по данным СВЧ-радиометра SSMI KA DMSP. Сравнение спутниковых данных с данными судовых измерений (рис.3б) показывает их удовлетворительное согласие с учетом различий в характеристиках пространственного разрешения [4].

Как известно, для района Северной Атлантики, где проводились исследования характерна высокая повторяемость туманов, в основном адвективных. Это связано с высокой разницей температур Лабрадорского течения ( $\sim 0-5^{\circ}\text{C}$ ) и теплого течения Гольфстрим ( $\sim 15^{\circ}\text{C}$ ). Водность наиболее мощного тумана (видимость менее 50 м, мощность около 200 м) оценивается величиной менее  $0.6 \text{ г/м}^3$ . Водозапас исследуемых в этот период туманов составлял менее  $0.1 \text{ кг/м}^2$ . Полученные оценки водности туманов согласуются с модельными представлениями, полученными в [9].

Комплексные исследования атмосферы с применением СВЧ-радиометров позволяют сделать следующие выводы:

1) Метод и средства радиотеплолокации позволяют проводить оперативный контроль состояния атмосферы, определять в реальном времени влагозапас атмосферы и водозапас облаков с высоким пространственно-временным разрешением,

2) Радиотеплолокационные данные о водозапасах облаков слоистых форм согласуются эмпирическими моделями водности облаков, а также с данными спутникового зондирования над океаном,

3) Двухчастотный СВЧ-радиометр (9,5 и 36,5 ГГц) позволяет определять водозапас различных типов облаков в широком диапазоне вариаций жидкокапельной части водности, в том числе позволяет исследовать эволюцию переохлажденной части конвективных облаков,

4) Полученные с помощью двухчастотного радиометра (22 и 36 ГГц) данные о влагозапасе атмосферы согласуются с данными аэрологического зондирования атмосферы (СКО составляет около  $0.5-1 \text{ кг/м}^2$  при вариациях влагозапаса атмосферы в диапазоне от 4 до  $45 \text{ кг/м}^2$ ),

5) Применение методов наземной СВЧ-радиометрии перспективно для выявления благоприятных для развития мощной конвекции условий в атмосфере, а также для совершенствования методов диагностики атмосферных фронтов [10].

### **Выводы**

Получены результаты экспериментальных характеристик влагосодержания атмосферы, конвективных, слоистообразных облаков и туманов с применением наземной радиотеплолокации при различных метеорологических условиях в Ленинградской области, в том числе при прохождении атмосферных фронтов циклонов. Эксперименты продемонстрировали возможности уточнения диагностики мезомасштабной структуры атмосферных фронтов на основе применения данных наземных радиометров влажностного зондирования атмосферы. Таким образом, показано, что метод наземной радиотеплолокации является перспективным для совершенствования методов оперативного контроля состояния атмосферы и прогнозирования опасных явлений погоды, связанных с облаками.

### **Литература**

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Ленинград: Гидрометеиздат. – 1987. – 253 с.
2. Westwater E.R. Ground-based microwave remote sensing of meteorological variables // Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry / Ed. by M.A. Janssen. New York: John Wiley. – 1993. – P.145-213.

3. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т.28, №12. – С.1122-1127.
4. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Определение содержания парообразной и жидкокапельной влаги из измерений микроволнового излучения атмосферы. // Известия вузов. Радиофизика. 2021. – Т.64. – № 12. – С.942-953.
5. Васищева М.А., Щукин Г.Г. Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы. Обнинск. –1977. – 94с.
6. Колдаев А.В. Щукин Г.Г. Исследование водозапаса зимних облаков методами микроволновой радиометрии // Труды ГГО. – 2009. – Вып.559. – С.210-236.
7. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. URSS. – 2016. – 333с.
8. Образцов С.П., Щукин Г.Г. Определение температурно-влажностных характеристик атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых СВЧ-радиометрических измерений // Метеорология. Ученые Записки. – 2006. – № 3. – С.28-45.
9. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. Л., Гидрометеиздат. – 1981. – 310с.
10. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Исследование сверхвысокочастотного радиометрического влажностного зондирования атмосферы для раннего предупреждения опасных явлений погоды // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т.68, №6. – С.615-620.