

## **О возможности построения полуэмпирической модели для вариаций влагозапаса атмосферы по данным микроволновой радиометрии**

А.Н. Ефременко, Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, 13, dm.karavaev@mail.ru*

*Рассмотрены возможности совершенствования модели облачной атмосферы с использованием микроволновой радиометрии, а также некоторые результаты экспериментальных исследований мезомасштабных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных метеорологических условиях и построения на их основе аппроксимаций для структурных функций влагозапаса атмосферы.*

*Reviewed approaches to improve the tropospheric moisture patterns using microwave radiometry, as well as the results of experimental study mesoscale variations of water vapor and cloud liquid during in different meteorological condition and build on their basis of approximations for structural functions of water vapor.*

### **Введение**

Исследования в области совершенствования моделей атмосферы представляют интерес для физики атмосферы, прикладной метеорологии, радионавигации. Несмотря на интенсивное развитие технологий мезомасштабного гидродинамического моделирования атмосферных процессов не исчерпан ресурс применения статистических эмпирических моделей [1,2], которые для решения задач прикладной метеорологии, моделирования дистанционного зондирования атмосферы, условий распространения радиоволн в атмосфере актуальны. Интерес вызывают исследования и моделирования наиболее изменчивых, сложно прогнозируемых вариаций влажности воздуха в атмосфере и водности облаков. Развитие моделей не представляется без использования современных средств дистанционных высокоточных измерений параметров атмосферы, среди которых можно выделить метод микроволновой радиометрии. Задачей данной работы ставилось экспериментальное исследование мезомасштабных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных регионах по данным микроволновых радиометров и возможностей совершенствования моделей облачной атмосферы.

### **Модели облачной атмосферы и микроволновая радиометрия**

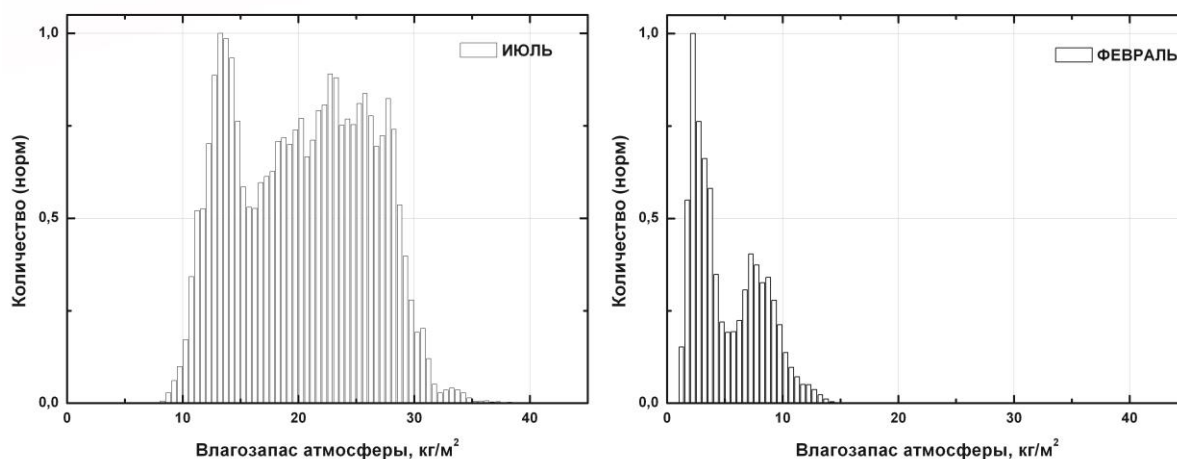
Требования к качеству гидрометеорологической информации постоянно повышаются. В настоящее время прогностические центры погоды широко используют и развивают мезомасштабные гидродинамические модели атмосферы, их разрешение постоянно улучшается [3]. Для задач прогноза погоды среди важнейших метеорологических величин отмечаются давление воздуха, профили температуры и влажности воздуха, водность и ледность облаков, интенсивность осадков, параметры ветра. Для совершенствования работы моделей над сушей все большая роль должна отводиться развитию распределенных наземных наблюдений с использованием средств дистанционного зондирования атмосферы, которые для задач по исследованию нижней атмосферы являются предпочтительными с точки зрения достижения высоких пространственного и временного разрешения, точности, возможности детального изучения физических процессов, существенно дополняя спутниковую информацию.

Для моделирования методов дистанционного зондирования используются модели облачной атмосферы [2,5]. На основе использования дополнительной информации, получаемой по данным спутниковых и наземных средств микроволновой радиометрии, существует возможность совершенствования подобных моделей облачной атмосферы.

В данной работе на основе исследований микроволнового излучения вблизи центра линии поглощения водяного пара 22.235 ГГц получены данные о вариациях влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, которые интерпретируются для исследований:

- особенностей статистических распределений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных регионах;
- мезомасштабных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, структурных функций влагозапаса атмосферы, корреляции влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков;
- особенностей построения глобальных полей влагозапаса атмосферы по данным спутниковой микроволновой радиометрии;
- вариаций влагозапаса атмосферы в период развития опасных явлений погоды, связанных с облаками и разработка критериев развития опасных явлений.

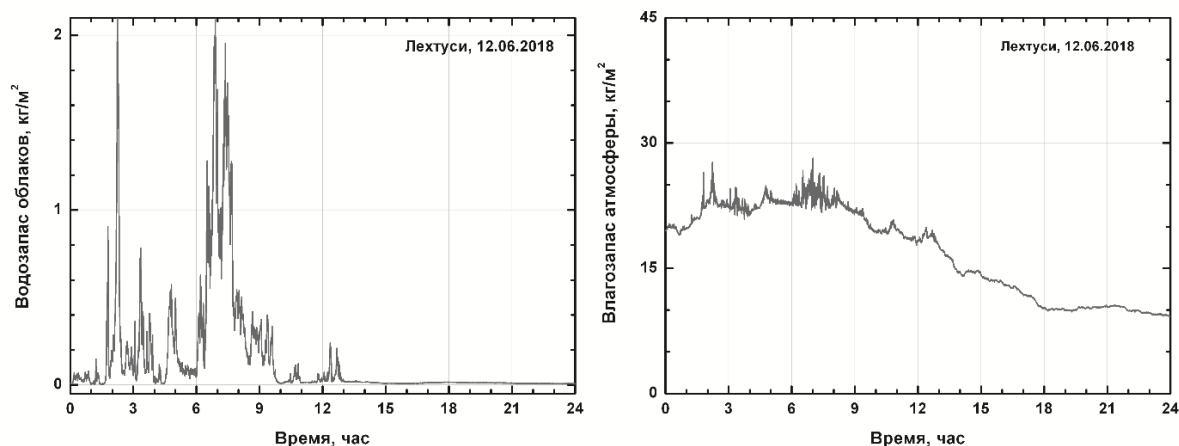
В экспериментах использовались наземные и судовые двух частотные радиометры диапазона частот около 22.2 ГГц и 36.5 ГГц. Методика наблюдений заключалась в измерениях радиояркостных температур в зените (при отсутствии осадков) по методике временных разрезов и определение влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков [1,4]. Установлено хорошее согласие микроволновых радиометрических измерений влагозапаса атмосферы с данными аэрологического зондирования атмосферы (СКО составляет около  $1 \text{ кг/м}^2$ ). Статистические распределения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков имеют характерные сезонные особенности. Гистограммы влагозапаса атмосферы для летнего и зимнего месяцев в Ленинградской области приводятся на рис.1. Полученные данные о влагозапасе атмосферы не противоречат [1].



**Рис.1. Гистограммы влагозапаса атмосферы**

Статистические распределения водозапаса облаков также имеют характерные сезонные особенности, что по всей видимости объясняется температурной зависимостью водности облаков. Если, в летний период в Ленинградской области водозапас облаков превышает  $0.8 \text{ кг/м}^2$  в 5-10 % случаев, то в зимний период водозапас облаков, как правило, не превышает  $0,5 \text{ кг/м}^2$ . Для аппроксимации среднемесячных распределений водозапаса облаков может использоваться логнормальное распределение, однако, для слоистообразных облаков часто применимо нормальное распределение.

На рис.2 приводится пример суточного хода водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы 12 июня 2018 г. в Ленинградской области. Эксперимент проводился в Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского с использованием двухчастотного, 20.6 ГГц и 32 ГГц, радиометра водяного пара Института прикладной астрономии РАН.



**Рис 2. Временные вариации водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы**

Полученные ряды данных влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков использовались для: а) анализа вариаций влагозапаса атмосферы при различных временных интервалах; б) построения структурных функций исследуемых параметров на временных масштабах от минуты до суток.

Анализ вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при различных метеорологических условиях показывает, что интенсивности временных вариаций влагозапаса атмосферы в значительной степени зависят от метеоусловий, максимальные значения вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков наблюдались в теплых секторах циклонов, а минимальные значения - при антициклонических ситуациях. Скорость изменения влагозапаса атмосферы в области атмосферных фронтов над океаном может составлять около  $0.2 \text{ кг/мин м}^2$ , а вариации влагозапаса атмосферы могут составлять  $15\text{-}20 \text{ кг/м}^2$ . Для аппроксимации экспериментальных средних временных структурных функций влагозапаса атмосферы на временных интервалах от нескольких минут до суток для условий Ленинградской области использовалась степенная функция вида  $D_Q(\Delta t) = C_Q^2 \Delta t^\mu$ , с показателем степени  $\mu=0.55\text{-}0.75$ .

Для описания пространственных (временных) вариаций влагозапаса атмосферы на различных пространственных интервалах, в качестве гипотезы, исследуется полумпирическая модель для структурной функции влагозапаса атмосферы, в соответствии с которой выделяются три различные области изменения структурной функции: при  $r_0 < r < r_1$ ,  $D_Q(r) = C_1^2 r^{5/3}$ ; при  $r_1 < r < r_2$ ,  $D_Q(r) = C_2^2 r^{2/3}$ ; при  $r_2 < r$ ,  $D_Q(r) = C_3^2 r^{2/3}$ . Здесь,  $C_i$  - средние структурные коэффициенты;  $r_0, r_1, r_2$  - характерные масштабы.

Сравнительные эксперименты показали согласие спутниковых данных SSMIS/DMSP и судовых измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков над океаном для района Северной Атлантики [6]. Вариации влагозапаса атмосферы над океаном могут существенно различаться в зависимости от региона, сезона года, метеорологических условий, различаются также ортогональные составляющие поперечной и продольной пространственной структурных функций влагозапаса

атмосферы. Для примера, оценки средних значений влагозапаса атмосферы и его среднеквадратических отклонений для различных районов Мирового океана по спутниковым данным за период с 1997 г. по 2017 г. представлены в табл. 2, при этом использовались информационные продукты Центра дистанционного зондирования, содержащие глобальные поля параметров атмосферы на географической сетке 0,25°.

Таблица 2. Средние значения влагозапаса атмосферы (знаменатель), средние квадратические отклонения (числитель) в  $\text{кг}/\text{м}^2$  для районов Мирового океана

Долгота, град.	Широта, град.					
	50 Ю.Ш.	30 Ю.Ш.	10 Ю.Ш.	10 С.Ш.	30 С.Ш.	50 С.Ш.
60 В.Д.	11.41 / 3.10	24.81 / 7.90	45.46 / 8.50	39.16 / 8.89	-	-
185 В.Д.	13.94 / 3.65	24.73 / 7.81	51.88 / 6.29	45.66 / 8.37	29.52 / 8.57	13.74 / 7.01
215 В.Д.	13.76 / 3.53	26.50 / 7.78	40.24 / 7.34	45.92 / 7.77	24.60 / 5.11	15.79 / 6.12
330 В.Д.	11.15 / 3.24	27.06 / 7.73	33.97 / 5.17	42.36 / 9.26	25.84 / 6.01	17.78 / 5.48

На рис. 3 представлен временной ход влагозапаса атмосферы для районов Северной Атлантики и Тихого океанов.

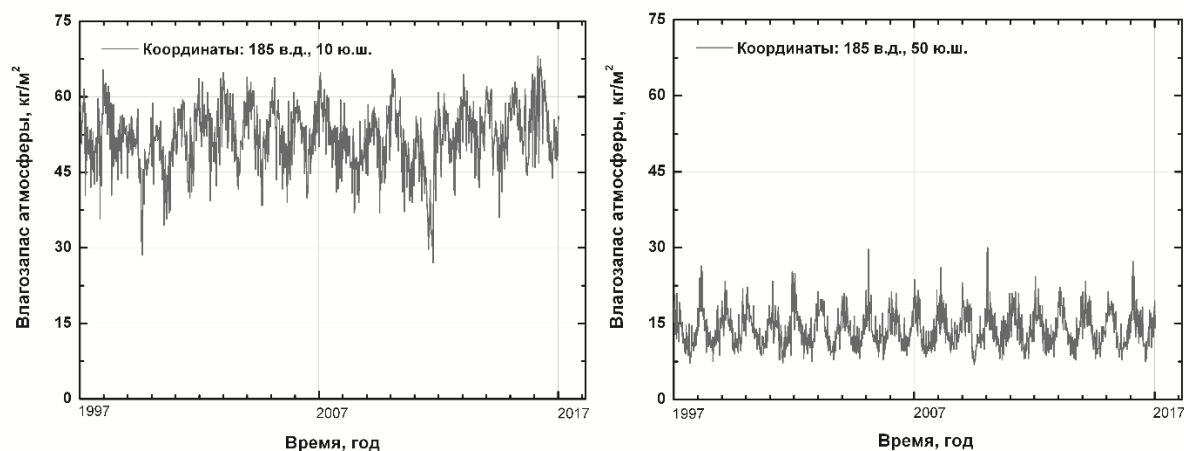


Рис 3. Вариации влагозапаса атмосферы над океаном

Анализ спутниковых данных показал, что наибольшие значения относительных вариаций влагозапаса атмосферы наблюдаются для районов средних широт, наблюдается годовой цикл изменений влагозапаса атмосферы.

### Заклучение

Продемонстрированы возможности микроволновой радиометрии для исследования мезомасштабных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков с использованием наземных, судовых и спутниковых радиометров и совершенствования модели облачной атмосферы. Получены оценки интенсивностей вариаций влагозапаса атмосферы на различных масштабах для различных регионов и метеорологических условий и аппроксимации структурных функций влагозапаса атмосферы.

## Литература

1. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии.-Л.:Гидрометеоиздат.1987. - 283с.
2. Васищева М.А., Шукин Г.Г. Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы. Обнинск.1977. - 94с.
3. Ефременко А.Н., Бунина Ю.Е., Караваев Д.М., Моисеева Н.О., Черный В.В. Методические вопросы развития технологии гидродинамического прогнозирования на основе использования данных дистанционного зондирования. VIII Армандовские чтения: Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». ИПЦ МИ ВлГУ, 2018. - С.323-326.
4. Караваев Д.М., Шукин Г.Г., Состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы. Оптика атмосферы и океана. 2015. Т.28. №12. - С.1122-1127.
5. Модель влажности воздуха в Северном полушарии. ГОСТ 26352-84. – М., Госстандарт СССР, 1984.
6. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. Исследование вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным микроволновых радиометров. Материалы 30 Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского. 2017. Вып.12. Т.2. -С.204-214.