

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.551.08

## Исследование вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков методом микроволновой радиометрии

Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин\*

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Поступила в редакцию 17.05.2019 г.

Рассмотрены возможности современных микроволновых радиометров для исследования вариаций характеристик влагосодержания атмосферы. На основе данных наземных и спутниковых микроволновых радиометров исследованы временные и пространственные вариации влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в широком диапазоне временных масштабов в различных регионах над океаном и сушей, получены гистограммы влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, обсуждается аппроксимация средней временной структурной функции влагозапаса атмосферы.

*Ключевые слова:* влагозапас атмосферы, водозапас облаков, структурная функция, микроволновый радиометр; water vapor, cloud liquid, microwave radiometer, temporal structure functions.

### Введение

Метод микроволновой радиометрии эффективен для определения характеристик влагосодержания атмосферы по измерениям интенсивности собственного радиотеплового излучения. Преимущества этого метода заключаются в возможности проводить практически непрерывные дистанционные наблюдения при различных метеорологических условиях и исследовать вариации важнейших метеорологических параметров атмосферы в широком диапазоне пространственно-временных масштабов, изучать динамические процессы в атмосфере при прохождении атмосферных фронтов. В связи с развитием технологий мезомасштабного гидродинамического моделирования атмосферных процессов возрастает интерес к изучению особенностей и детальным исследованиям мезомасштабных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.

Цель работы — экспериментальные исследования вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в широком интервале пространственно-временных масштабов в разных регионах при различных метеорологических условиях.

### Микроволновая радиометрия влажностного зондирования атмосферы

Для исследования временных и пространственных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса

облаков могут использоваться методы и средства наземного, спутникового, судового и самолетного зондирования [1, 2]. Среди известных наземных микроволновых радиометров, удовлетворяющих современным требованиям измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, можно отметить зарубежные — Radiometrics Corporation (США) [3] и Radiometer Physics GmbH (Германия), а также отечественные разработки — комплекс «Микрорадарком» (ЦАО) [4], радиометр СКБ ИРЭ РАН и ИПА РАН [5]. Современные микроволновые радиометры способны работать в режиме автоматических длительных наблюдений при дискретности измерений от нескольких секунд и пространственным разрешением около 100 м (на высоте 1 км). При этом чувствительность современных радиометров достаточна, чтобы исследовать не только мезомасштабные вариации параметров атмосферы, но и особенности турбулентных флуктуаций параметров ее влагосодержания [6, 7].

В исследованиях широко используется метод наземного зондирования атмосферы на частотах вблизи центра линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц и в окне прозрачности 31–37 ГГц для отдельного определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков [2, 8]. Основные технические характеристики наземного двухчастотного радиометрического комплекса для влажностного зондирования атмосферы: центральная частота 22,2 и 36,0 ГГц, полоса усиления приемников 200–1000 МГц, угловое разрешение антенны 3–10°, шумовая температура приемников 100–300 К, погрешность определения влагозапаса атмосферы ~0,5 кг/м<sup>2</sup>, погрешность определения водозапаса облаков ~0,03 кг/м<sup>2</sup>; дискретность измерений обычно выбирается от нескольких секунд до 15 мин.

\* Дмитрий Михайлович Караваев (dm.karavaev@mail.ru);  
Георгий Георгиевич Щукин (gshchukin@mail.ru).

Для исследования влагозапаса полярной атмосферы измерения ее поглощения эффективно проводить вблизи центра линии водяного пара 183,31 ГГц или более высокочастотных линий около 340 или 380 ГГц. Примеры микроволновых экспериментов по исследованию влагозапаса полярной атмосферы в представленных диапазонах частот можно найти в работе [9].

Спутниковые измерения в микроволновом диапазоне частот не зависят от освещенности и могут проводиться в широком диапазоне вариации параметров облаков при отсутствии осадков. Первый спутниковый эксперимент осуществлен в 1968 г. с помощью космического аппарата «Космос-243» с микроволновым радиометром ( $\lambda = 8,4; 3,5; 1,35; 0,8$  см) на борту [2]. Первый опыт проведения измерений с поляризационным радиометром ( $\lambda = 0,8$  см) получен в 1974 г. на экспериментальном спутнике «Метеор-18» [10]. В 1990-х гг. в состав исследовательского модуля «Природа» орбитальной станции «Мир» входил многочастотный радиометрический комплекс «Икар-Дельта», который использовался для определения водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы, скорости приводного ветра, выявления зон осадков, характеристик поверхности. В настоящее время проведение микроволновых измерений для получения оперативной глобальной информации о распределении влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков над поверхностью Мирового океана возможно на искусственных спутниках Земли, оснащенных многочастотными микроволновыми радиометрами [12], например: SSMIS (DMSP), Windsat (Coriolis), AMSR-2 (GCOM-W1), ATMS (Suomi NPP), AMSU-A (MetOp), MWHTS (FY-3C), GMI (GPM), МТВЗА-ГЯ («Метеор-М») [13] и др. 5 июля 2019 г. состоялся запуск с космодрома «Восточный» очередного оперативного космического аппарата «Метеор-М» № 2-2 с радиометром МТВЗА-ГЯ [11]. Современный этап развития спутниковой микроволновой радиометрии связан с разработкой радиометра МТВЗА для «Метеор-3М» (2001 г.) и МТВЗ-ОК для космического аппарата «Сич-1М».

Особенности получения спутниковых данных заключаются в том, что антенны радиометров обеспечивают относительно низкое пространственное разрешение на поверхности около  $20 \times 30$  км<sup>2</sup> на частоте 22,3 ГГц, а полное покрытие поверхности Земли с помощью одного спутника осуществляется за период от 1 до 3 сут. К преимуществам спутникового метода следует отнести возможности получения в течение нескольких минут полей влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков для выделенного района, при этом полоса обзора может составлять ~1500–2500 км. Однако для возможностей исследования вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в области мезо-γ масштабов существуют принципиальные объективные ограничения, связанные с относительно низким пространственным разрешением антенных систем и ограничениями чувствительности радиометров при вынужденной высокой скорости измерений. Наиболее критичным образом они могут проявляться при изучении простран-

ственных вариаций водозапаса облаков, так как этот параметр атмосферы характеризуется ярко выраженной изменчивостью характеристик при естественной эволюции.

## Мезомасштабные вариации влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков

Экспериментальные исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков выполнены над различными районами Северной Атлантики и над сушей в Ленинградской обл. с применением автоматизированных микроволновых радиометров (частоты 21,0 ГГц или 22,2 и 36,5 ГГц). Микроволновые радиометрические измерения характеристик излучения атмосферы проводились по методике временных разрезов, когда радиояркие температуры атмосферы измеряются при фиксированных углах места. Эта методика имеет преимущества по сравнению с методикой угломестных разрезов при исследовании относительно быстрых вариаций излучения облачной атмосферы. Однако применение абсолютных измерений требует тщательной отработки схемы калибровки радиометров и обеспечения стабильной работы радиоприемных устройств. Пример суточного хода радиоярких температур на частотах 20,7 и 32 ГГц, полученных в Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (Ленинградская обл.) весной 2018 г. с использованием радиометра водяного пара [13], приводится на рис. 1. Частота измерений составлял 5 с, чувствительность лучше 0,05 К при постоянной усреднения 1 с для каждого канала радиометра.

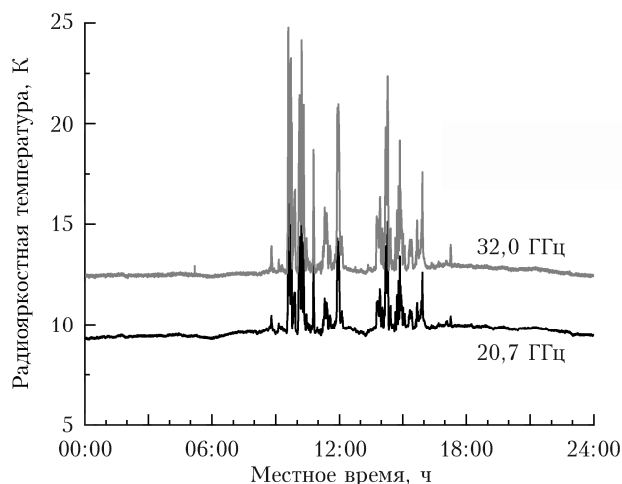


Рис. 1. Суточный ход радиоярких температур по измерениям радиометром водяного пара (Лехтуси, 28.03.2018 г.)

Известно, что на частотах вблизи центра линии водяного пара 22,235 ГГц и в окнах прозрачности атмосферы 31–38 и 75–95 ГГц вариации радиоярких температур определяются в основном вариациями влажности воздуха и водности облаков [1, 6, 14]. Интенсивность мелкомасштабных турбулентных

флуктуаций поглощения безоблачной атмосферы в микроволновом диапазоне частот, как показывают теоретические оценки [1], составляет менее 1%. Эти оценки согласуются с известными результатами экспериментальных исследований флуктуаций поглощения атмосферы на частотах около линии поглощения водяного пара 22,23 ГГц [6, 7, 15]. Современные радиометры могут использоваться для исследования турбулентных флуктуаций влагозапаса атмосферы на масштабах от нескольких десятков метров.

Полученные ряды данных влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков использовались для анализа вариаций влагозапаса атмосферы на временных интервалах 1 и 3 ч, построения структурных функций исследуемых параметров на временных масштабах от минуты до суток.

Для получения оценок интенсивности мезомасштабных пространственных вариаций влагозапаса атмосферы над океаном использовались спутниковые данные микроволновых зондировщиков, а также привлекались архивные данные судовых микроволновых измерений в средних широтах над районами Северной Атлантики. Эксперимент по исследованию роли энергоактивных зон океана в колебаниях климата «Атлантэкс-90» («Разрезы») [16] проводился весной 1990 г., полученные данные судовых исследований атмосфер над океаном, на наш взгляд, уникальны. В этих экспериментах использовался судовой двухканальный радиометр; измерения радиоярких температур на частотах 22,2 и 36,5 ГГц выполнялись при фиксированном угле места по методике временных разрезов; определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при отсутствии осадков проводились по регрессионной методике. Сравнительные эксперименты показали хорошее согласие данных микроволновых радиометрических измерений влагозапаса атмосферы с данными аэрологического зондирования атмосферы: СКО  $\sim 1$  кг/м<sup>2</sup> при вариациях влагозапаса атмосферы в диапазоне от 2 до 45 кг/м<sup>2</sup>.

Статистические распределения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков имеют характерные сезонные особенности. В качестве примера на рис. 2 приводятся типичные среднемесячные гистограммы водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы для летнего месяца (июнь, Ленинградская обл.). Полученные оценки средних значений влагозапаса атмосферы и СКО согласуются с данными статистических исследований на основе данных аэрологического зондирования атмосферы [1].

Сезонные различия статистических распределений влагозапаса атмосферы отмечены в [17]. В зимний период в Ленинградской обл. в 96% случаев водозапас облаков не превышал 0,28 кг/м<sup>2</sup>, а значения выше 0,5 кг/м<sup>2</sup> регистрировались лишь в 1% случаев измерений; над океаном водозапас облаков составлял менее 0,5 кг/м<sup>2</sup> в 90% случаев. Для аппроксимации распределения водозапаса облаков может использоваться логарифмически нормальное распределение.

Для построения временных структурных функций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков

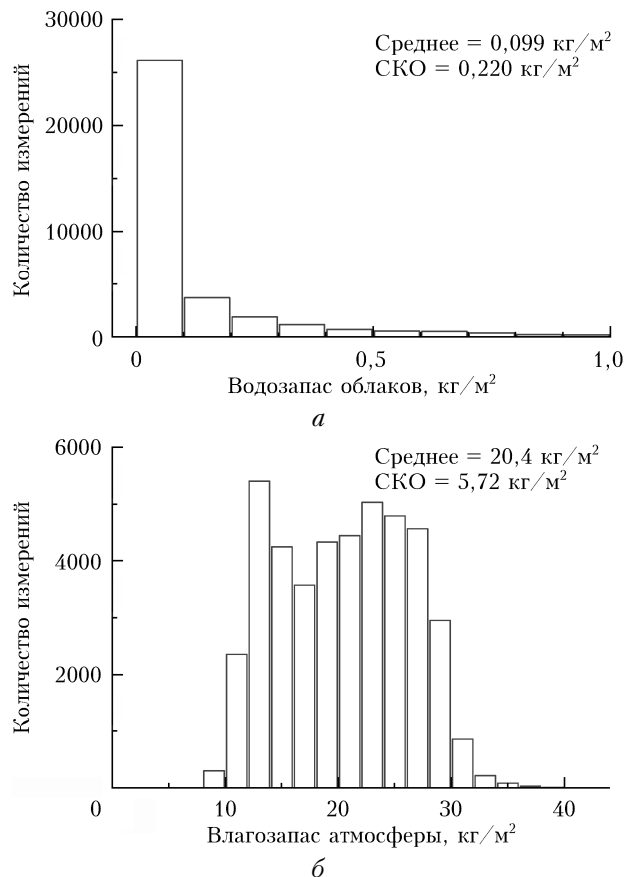


Рис. 2. Гистограммы: а – водозапаса облаков; б – влагозапаса атмосферы по измерениям наземным микроволновым радиометром (июнь 2007 г., Ленинградская обл., 60° с.ш., 30° в.д.)

применялись временные ряды измеренных радиоярких температур при фиксированном угле места, а значения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в зенитном направлении определялись в соответствии с [8]. Для примера на рис. 3 показаны средние временные структурные функции влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.

Для аппроксимации средних временных структурных функции влагозапаса атмосферы на временном интервале от 10 мин до нескольких суток использовалась степенная функция  $D_Q(\Delta t) = C_Q^2 \Delta t^\alpha$ , где  $\alpha = 0,55-0,75$ ; коэффициент  $C_Q = 0,46$  (лето) и  $0,1$  кг/м<sup>2</sup> · мин<sup>1/3</sup> (зима) для условий Ленинградской обл.,  $C_Q = 0,23-0,93$  кг/м<sup>2</sup> · мин<sup>1/3</sup> (апрель, Северная Атлантика). Для описания пространственных (временных) вариаций влагозапаса атмосферы на различных пространственных интервалах в [18] предлагается полуэмпирическая модель структурной функции влагозапаса атмосферы, в соответствии с которой выделяется три различные области изменения структурной функции:  $r_0 < r < r_1$  ( $D_Q(r) = C_1^2 r^{5/3}$ );  $r_1 < r < r_2$  ( $D_Q(r) = C_2^2 r^{2/3}$ );  $r_2 < r$  ( $D_Q(r) = C_3^2 r^{2/3}$ ). Здесь  $C_i$  – средние интегральные структурные коэффициенты;  $r_0$  – так называемый «внутренний»,  $r_1, r_2$  – «внешние» характерные пространственные масштабы.

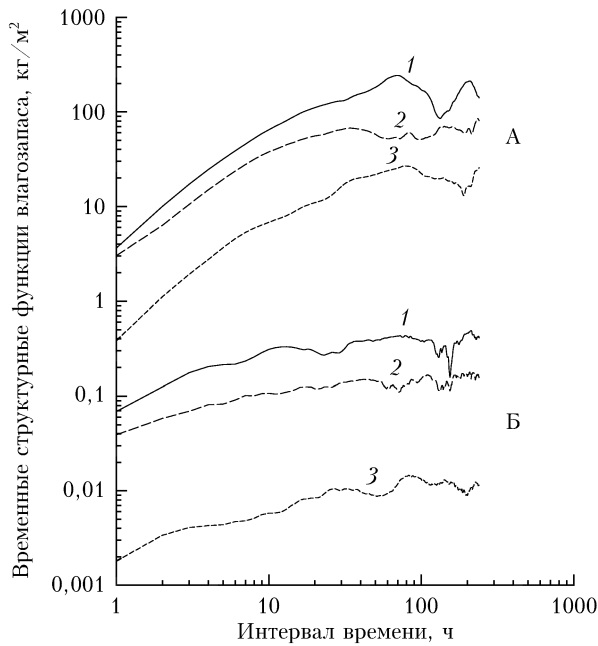


Рис. 3. Средние временные структурные функции влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков: 1 – апрель, Северная Атлантика; 2 – июль, Ленинградская обл.; 3 – январь, Ленинградская обл.

Интенсивность вариаций влагозапаса атмосферы зависит от метеорологических условий, при этом максимальные значения вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков наблюдались в теплых секторах циклонов, а минимальные значения – при антициклонических ситуациях. Исследования позволили оценить интенсивность вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различные сезоны года при различных метеорологических ситуациях для временных интервалов от нескольких минут до нескольких суток. Полагая, что СКО влагозапаса атмосферы связаны с величиной структурной функции соотношением  $\sigma_Q(\Delta t) = \sqrt{0,5D_Q(\Delta t)}$ , можно получить оценки среднемесячных интенсивностей вариаций влагозапаса атмосферы или СКО при заданных временных интервалах. Так, например, для условий Ленинградской обл. СКО влагозапаса может меняться от 0,18 (январь) до 0,67 кг/м<sup>2</sup> (июль) при  $\Delta t = 15$  мин.

Для анализа временных и пространственных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков над океаном использовались данные спутниковых микроволновых радиометров SSMI/SSMIS DMSP F08, F13, F16, F17. Информационные продукты Центра дистанционного зондирования RSS (Remote Sensing Systems) содержат суточные, трехдневные, недельные или месячные глобальные поля восстановленных метеорологических параметров атмосферы на географической сетке с шагом 0,25° [19]. Сравнительные эксперименты по исследованию временных рядов водозапаса облаков с борта научно-исследовательского судна погоды совместно с анализом пространственных спутниковых карт водозапаса облаков над океаном показали, что данные спутни-

ковых и судовых измерений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков согласуются друг с другом [20].

Меридиональная ( $D_Q(\Delta x)$ ) и широтная ( $D_Q(\Delta y)$ ) пространственные структурные функции влагозапаса атмосферы определялись выражениями

$$D_Q(\Delta x) = \left\langle \left[ \delta Q(x + \Delta x, y_0, t) - \delta Q(x, y_0, t) \right]^2 \right\rangle,$$

$$D_Q(\Delta y) = \left\langle \left[ \delta Q(x_0, y + \Delta y, t) - \delta Q(x_0, y, t) \right]^2 \right\rangle, \quad (1)$$

где  $\delta Q(x, y, t) = Q(x, y, t) - \overline{Q(x, y, t)}$  – отклонение влагозапаса атмосферы от среднего значения,  $\overline{Q(x, y, t)}$  – среднее значение влагозапаса атмосферы в точке с координатами  $(x, y)$ .

В общем случае меридиональная и широтная пространственные структурные функции могут существенно различаться в зависимости от метеорологических условий [20]. Более высокие значения меридиональной структурной функции, по всей видимости, обусловлены преимущественным направлением переноса воздушных масс с юга на север. Спутниковые данные показывают широкий диапазон изменений пространственных структурных функций влагозапаса атмосферы над океаном в различные сезоны года. Для ряда регионов, включая Северную Атлантику, отмечаются высокие вариации влагозапаса атмосферы. Численные оценки пространственных структурных функций влагозапаса атмосферы (для горизонтальных масштабов ~150 км) по данным SSMIS DMSP F17 для выделенного района исследований Северной Атлантики (координаты: 40–50° с.ш., 40–50° з.д.) приводятся в табл. 1. Как видно из приведенных данных, интенсивность вариаций влагозапаса атмосферы изменяется в широком диапазоне в любое время года, так же как и пространственная структурная функция влагозапаса атмосферы  $D_Q(\rho)$  (от 0,13 до 74,8 кг<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>). Минимальные вариации водозапаса отмечаются, как правило, в области холодных воздушных масс с низким влагозапасом в условиях антициклонов.

Таблица 1

Оценки пространственных структурных функций влагозапаса атмосферы над океаном по данным SSMIS DMSP в 2014 г. (минимум/максимум) на масштабах ~150 км

Структурная функция	I	IV	VI	X
$D_Q(\Delta x)$	0,26/9,83	0,13/11,7	2,38/74,8	0,37/17,7
$D_Q(\Delta y)$	0,48/27,4	0,55/14,0	5,98/69,3	3,01/53,5

Интерес представляет сравнение полученных результатов с прежними оценками временной структурной функции влагозапаса атмосферы, полученными для выбранного района Атлантического океана по данным судового микроволнового радиометра. Эти сравнения могут быть выполнены в предположении гипотезы Тейлора о замороженной турбулентности  $D_Q(\rho) = D_Q(\Delta t \cdot V)$ , где  $V$  – средняя скорость переноса неоднородностей. Вопрос о правомерности

использования этой гипотезы для построения пространственных структурных функций по временным структурным функциям в широком диапазоне пространственно-временных масштабов остается дискуссионным по многим причинам, среди которых можно отметить интенсивные процессы фазовых превращений водяного пара над океаном, сложную и изменчивую структуру поля ветра в районе исследований. Тем не менее полученные оценки пространственных структурных функций для выбранных пространственных масштабов не противоречат оценкам временных структурных функций, вычисленным ранее по данным судовых радиометрических измерений.

Основные проблемы проведения сравнительных экспериментов с целью получения количественных оценок погрешностей спутниковых измерений водозапаса облаков связаны, в частности, с недостаточной высокой пространственным разрешением спутниковых радиометров. Однако использование метода гистограмм и погодных фильтров при анализе экспериментальных данных позволяет для редких случаев наблюдения обширных квазиоднородных полей слоистообразной облачности, когда разница спутниковых и судовых измерений водозапаса облаков составляла менее 20%, сделать вывод о качественном согласии спутниковых и судовых измерений водозапаса облаков.

Также интересно сравнить результаты микроволновых измерений водозапаса облаков с независимыми данными их исследований, в качестве которых привлекались имеющиеся архивные данные самолетных контактных измерений водности слоистообразных облаков [21]. Такие сравнительные эксперименты, выполненные для различных типов облаков — Sc (высоко-кучевые), Ac (слоисто-кучевые), Ns (слоисто-дождевые), — показывают качественное согласие данных микроволновых измерений водозапаса облаков с архивными эмпирическими данными их самолетных исследований для Ленинградской обл.

Оценки средних значений водозапаса атмосферы и его среднеквадратических отклонений для районов Мирового океана на основе спутниковых данных за период с 1997 по 2016 г. представлены в табл. 2.

На рис. 4 приведен временной ход водозапаса атмосферы для Тихого океана. Анализ спутниковых данных показал, что наибольшие значения относительных вариаций водозапаса атмосферы наблюдаются в средних широтах, также виден годовой цикл изменений водозапаса атмосферы.

Особенности распределения водозапаса в экваториальной тропической зоне конвергенции Мирового океана впервые были отмечены в эксперименте 1968 г. с использованием искусственного спутника

Таблица 2

Средние значения водозапаса атмосферы (знаменатель) и его среднеквадратические отклонения (числитель), кг/м<sup>2</sup>, в различных районах Мирового океана

Координата	50° ю.ш.	30° ю.ш.	10° ю.ш.	10° с.ш.	30° с.ш.	50° с.ш.
0° в.д.	10,71/2,89	20,42/4,60	32,66/7,18	—	—	—
60° в.д.	11,41/3,10	24,81/7,90	45,46/8,50	39,16/8,89	—	—
90° в.д.	11,26/2,89	20,13/5,69	47,91/7,81	49,66/9,56	—	—
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
270° в.д.	13,14/3,31	20,93/4,43	29,51/7,87	47,82/9,21	—	—
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

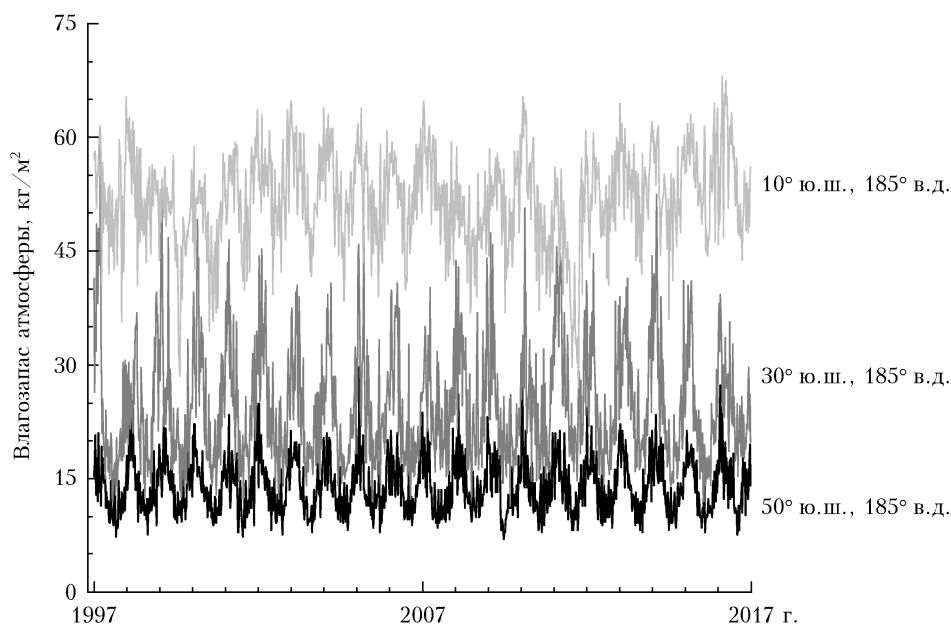


Рис. 4. Вариации водозапаса атмосферы для трех районов Тихого океана

Земли «Космос-243». Эти особенности, по всей видимости, отражают сложные процессы взаимодействия атмосферы, океана и суши. Полученные результаты могут быть полезны для совершенствования моделей тропосферы в задачах радионавигационного обеспечения.

## Заключение

Выполненная работа показала возможности современных микроволновых радиометров в исследованиях вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в широком интервале пространственно-временных масштабов. На основе экспериментальных данных наземных и судовых микроволновых радиометров диапазона частот 22,2 и 36 ГГц изучены временные вариации этих параметров при различных метеорологических условиях в разных регионах над сушей и над океаном. Получены оценки интенсивности вариаций исследуемых величин, аппроксимации для временных структурных функций влагозапаса атмосферы. С помощью данных спутниковых измерений исследованы пространственно-временные вариации влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков над океаном, показавшие сложный характер их широтной и сезонной зависимостей.

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 283 с.
2. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение земли как планеты. М.: Наука, 1974. 118 с.
3. Ware R., Carpenter R., Guldner J., Liljegren J., Nehrkorn T., Solheim F., Vandenberghe F. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // *Radio Science*. 2003. V. 38, N 4. P. 8079–8092.
4. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троцкий А.В., Точилкина Т.А., Шапошников А.Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.
5. Ильин Г.Н., Быков В.Ю., Стэмковский В.Г. Система мониторинга тропосферных параметров на основе радиометра водяного пара // *Тр. ИПА РАН*. 2013. Вып. 27. С. 204–201.
6. Kutuza V.G. Spatial and temporal fluctuations of atmospheric microwave emission // *Radio Sci.* 2003. V. 38, N 3. P. 8047–8059.
7. Кутуза Б.Г., Егоров Д.П., Казарян Р.А. Влияние водяного пара и облачности на флуктуации радиоизлучения атмосферы в частотном диапазоне 18–27 ГГц // XI Всерос. конф. «Радиолокация и связь». М., 2016. С. 203–206.
8. Караваяев Д.М., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 12. С. 1122–1127; Karavaev D.M., Shchukin G.G. Status and prospects of application of microwave radiometry

of the atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 3. P. 308–314.

9. Cimini D., Westwater Ed.R., Gasiewski A.W., Klein M., Leuski V.Y., Liljegren J.S. Ground-based millimeter- and submillimeter-wave observations of low vapor and liquid water contents // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007. V. 45, N 7. P. 2169–2180.
10. Горелик А.Г., Домбковская Е.П., Озеркина В.В., Семилетов В.И., Скуратова И.С., Фролов А.В. Микроволновые поляризационные измерения на спутнике «Метеор» // *Метеорол. и гидрол.* 1975. № 7. С. 36–45.
11. Jackson T.J., Hsu A.Y., Shutko A., Tishenko Y., Peterenko B., Kutuza V., Armand N. Priroda microwave radiometer observations in the Southern Great Plains 1997 hydrology experiment // *Int. J. Remote Sens.* 2002. V. 23, N 2. P. 231–248.
12. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли. Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд, 2016. С. 336.
13. Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А., Никитин О.В., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Т. 1, вып. 5. С. 243–248.
14. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
15. Stotskii A.A. Path length fluctuations through the Earth troposphere: Turbulent model and data of observations // *Proc. Sympos. Refractions of Transatmospheric Signals in Geodesy*. The Netherlands, 1992. P. 179–182.
16. Марчук Г.И. Проект научной программы по исследованию роли энергоактивных зон океана в колебаниях климата. М.: Гидрометеониздат, 1989. 109 с.
17. Ефременко А.Н., Караваяев Д.М., Щукин Г.Г. О возможности построения полумпирической модели вариаций влагозапаса атмосферы по данным микроволновой радиометрии // IX Арmandовские чтения: Всерос. науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром, 28–30 мая 2019 г. ИПЦ МИ ВлГУ, 2019. С. 291–294. URL: [www.mivlgu.ru/conf/armand/armandovskie-chteniya-archive](http://www.mivlgu.ru/conf/armand/armandovskie-chteniya-archive) (last access: 17.04.2019).
18. Караваяев Д.М., Щукин Г.Г. Исследование вариаций характеристик микроволнового излучения и параметров влагосодержания атмосферы // *Материалы VII Всерос. науч. конф. VI Арmandовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред*. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2016. С. 73–76.
19. Wentz F.J. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager // *J. Geophys. Research*. 1997. V. 102, N C4. P. 8703–8718.
20. Караваяев Д.М., Щукин Г.Г. Исследование вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по данным микроволновых радиометров // *Материалы 30 Всерос. симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред»*. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. Т. 2, вып. 12. С. 204–214.
21. Васищева М.А., Щукин Г.Г. Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1977. 94 с.

*D.M. Karavaev, G.G. Shchukin. Study of variations in water vapor and cloud liquid using microwave radiometry.*

Capabilities of modern microwave radiometers in the study of variations in atmospheric moisture characteristics are discussed. Based on the analysis of ground-based, shipborne, and satellite microwave radiometers, variations in the atmospheric water vapor and cloud liquid are analyzed in a wide range of time scales in different regions over the ocean and land; the approximation of the temporary structural function of atmospheric water vapor is considered.