

На правах рукописи

УДК 551.051

Караваев Дмитрий Михайлович

СВЧ-радиометрические исследования влагозапаса атмосферы  
и водозапаса облаков

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Георгий Георгиевич Щукин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Анатолий Дмитриевич  
Кузнецов,

доктор технических наук  
Андрей Александрович Синькевич

Ведущая организация: Военно-космическая  
академия им. А.Ф. Можайского

Защита состоится “10” ноября 2010г. в 10 час. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 327.005.01 при государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» по адресу: 194021, С-Петербург, ул. Карбышева, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова»

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 2010г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских и  
кандидатских диссертаций,  
доктор географических наук

А.В. Мещерская

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность работы и состояние вопроса.* Радиофизические методы дистанционного зондирования занимают важное место при исследовании атмосферных процессов для решения различных задач метеорологии, физики облаков, астрономии. Методы пассивного зондирования атмосферы в СВЧ-диапазоне позволяют получать информацию о температуре, влажности атмосферы, водности облаков и осадках, что важно для решения таких проблем как взаимодействие атмосферы и океана, общая циркуляция атмосферы и изменение климата, моделирование процессов облакообразования и осадкообразования, распространение микрорадиоволн в атмосфере. СВЧ-радиометрический метод, основанный на регистрации собственного радиотеплового излучения является одним из немногих эффективных методов определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков с поверхности Земли. Такие преимущества метода как дистанционность, оперативность, непрерывность, высокое пространственное разрешение, “всепогодность” особенно важны для информационного обеспечения наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений, контроля результатов активных воздействий, проведения подспутниковых экспериментов.

За последние более чем сорок лет решены фундаментальные вопросы переноса излучения в атмосфере, разработаны основы методов решения обратных задач, созданы высокочувствительные СВЧ-радиометры. Значительный вклад в развитие метода СВЧ-радиометрии атмосферы внесли К.С.Шифрин, А.Е.Башаринов, А.Г.Горелик, Б.Г.Кутуза, А.П.Наумов, Г.Г.Щукин, Ed.R.Westwater. Выполненные исследования показывают принципиальные возможности СВЧ-радиометрического метода определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.

Перспективы развития и использования СВЧ-радиометрических методов дистанционного зондирования атмосферы были сформулированы, в частности, в результате международного эксперимента VALTEX (2001-2002гг.). Важными вопросами, связанными с использованием данных дистанционного зондирования атмосферы и облаков остаются разработка экономичных оптимальных технических решений, методик СВЧ-радиометрических измерений, совершенствование алгоритмов обработки и интерпретация результатов дистанционного зондирования атмосферы. Актуальность исследований в области СВЧ-радиометрии связана с потребностью создания перспективной системы влажностного зондирования атмосферы и назревшей необходимостью оснащения метеорологической сети новыми средствами дистанционного зондирования атмосферы.

Среди важных направлений экспериментальных исследований особое место занимают комплексные исследования атмосферы с целью получения новых данных об изменчивости параметров атмосферы в период развития опасных явлений, мощных конвективных (в том числе грозных облаков). Для решения таких задач применение средств пассивного и активного зондирования атмосферы с элементами поляризационного анализа актуально для изучения

особенностей пространственно-временной изменчивости характеристик влагосодержания атмосферы, облаков и осадков, фазового состава облаков, содержания переохлажденной влаги в мощных конвективных облаках.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью работы являлось развитие СВЧ-радиометрического метода определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, создание автоматизированного комплекса аппаратуры, совершенствование методики измерения характеристик радиотеплового излучения, проведение экспериментов, направленных на исследование параметров атмосферы и процессов, происходящих в тропосфере. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- теоретические исследования переноса микроволнового излучения в облачной атмосфере для случая зондирования с поверхности Земли, разработка СВЧ-радиометрического метода определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и анализ погрешностей определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков;
- систематизация принципов построения наземной автоматизированной СВЧ-радиометрической аппаратуры для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, определение требований к характеристикам аппаратурного комплекса, создание автоматизированного СВЧ-радиометрического комплекса и исследование его характеристик, разработка алгоритмов обработки данных СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы;
- экспериментальные исследования, направленные на изучение временной (пространственной) изменчивости характеристик нисходящего радиотеплового микроволнового излучения облачной атмосферы, влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных регионах при различных метеоусловиях;

**Научная новизна работы** состоит в совершенствовании СВЧ-радиометрического метода определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. В этих целях выполнено следующее:

- обоснована и реализована структурная схема автоматизированного СВЧ-радиометрического комплекса аппаратуры для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков;
- оптимизирована методика измерения характеристик радиотеплового излучения атмосферы в СВЧ-диапазоне, обеспечивающая минимальные погрешности определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков;
- проведен анализ реальной погрешности определения влагозапаса облачной атмосферы по результатам измерений характеристик радиотеплового излучения атмосферы на длинах волн около 13,5 мм и 8 мм при различных метеоусловиях;
- впервые выполнен анализ пространственно-временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных регионах, при различных синоптических ситуациях;
- впервые получены и проанализированы новые экспериментальные данные комплексного пассивно-активного радиолокационного зондирования атмосферы в период развития мощных конвективных (грозовых) облаков, и

разработаны предложения по использованию СВЧ-радиометрической информации в задаче сверхкраткосрочного прогноза опасных гидрометеорологических явлений.

**Научная и практическая ценность работы.** Наиболее важными представляются следующие результаты исследований:

- обоснована структурная схема автоматизированной аппаратуры, и методика СВЧ-радиометрических измерений, обеспечивающие определение влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков с поверхности Земли;
- оценена реальная погрешность определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков СВЧ-радиометрическим методом при различных метеоусловиях;
- экспериментальные данные о временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных регионах (над океаном и над сушей) в различные сезоны, при различных метеоусловиях;

Предложенные методики и средства определения параметров атмосферы применялись при проведении комплексных экспериментов по изучению параметров облачной атмосферы для решения проблем энергетики взаимодействия атмосферы и океана, контроля результатов активных воздействий, определения условий распространения радиоволн в тропосфере Земли. Результаты работы использовались в отчетах по ряду научно-исследовательских тем, выполненных по программе “Разрезы”, связанных с активными воздействиями на облака, по межотраслевой научно-технической программе России “Физика микроволн”, по международному проекту VALTEX.

Разработанные в работе рекомендации направлены на построение перспективной системы влажностного зондирования на основе применения средств и метода сетевого СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы для решения задач наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза опасных гидрометеорологических явлений, связанных с развитием облаков и осадков. Результаты исследований, полученные в диссертации, могут использоваться при разработке наземной автоматизированной СВЧ-радиометрической аппаратуры температурно-влажностного зондирования атмосферы для обеспечения геофизического мониторинга атмосферы и решения других задач метеорологии.

**Апробация работы и публикации.** Полученные в ходе выполнения работы результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:

1. IV Всесоюзная конференция по исследованию роли энергоактивных зон океана в короткопериодных колебаниях климата (Одесса, октябрь 1990г);
2. II научная конференция “Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды” (Муром, июль 1992г.);
3. Международная конференция по применению дистанционных методов (Денвер, США, январь 1992г);

4. XVIII Всероссийская конференция по распространению радиоволн (С-Петербург, сентябрь 1996г.);
5. XIV Всероссийский симпозиум “Радиолокационные исследования природных сред” (С-Петербург, 1996г.);
6. Всероссийская конференция по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (Нальчик, октябрь 1997г.);
7. III международная выставка и симпозиум по дистанционным средствам измерения (Копенгаген, Дания, июль 1997г.);
8. Региональные III, IV, VIII, IX, X конференции по распространению радиоволн (С-Петербург, 1997, 1998, 2002, 2003, 2004гг.);
9. XXIII Генеральная ассамблея Европейского геофизического общества (Ницца, Франция, апрель 1998г.);
10. V Международный симпозиум “Оптика атмосферы и океана” (Томск, июнь 1998г.);
11. III научная конференция “Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды” (Муром, июнь 1999г.);
12. II Всероссийский семинар по физике микроволн (Н.Новгород, март 1999г.);
13. Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (Нальчик, октябрь 2005г.);
14. Конференция ВМО по метеорологическим приборам и методам наблюдений ТЕКО-2008 (С-Петербург, ноябрь 2008);
15. XXII Всероссийская конференция по распространению радиоволн (Ростов-на Дону, апрель 2008г.);
16. IV Всероссийская научная школа и конференция “Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред” (Муром, июль 2009г.);
17. Всероссийские научные конференции-чтения памяти Н.А.Арманда (Муром, июль 2010г.);

По результатам выполненных исследований опубликовано 32 работы.

**Личный вклад автора** заключался в постановке задач исследований, в формулировке требований к аппаратурному комплексу, участии в его создании, в разработке методик наблюдения, в проведении экспериментальных исследований атмосферы с помощью автоматизированных СВЧ-радиометров, в обработке и анализе полученных данных. Автором разработаны предложения по использованию методов СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы для решения задач сверхкраткосрочного прогноза опасных гидрометеорологических явлений, связанных с развитием облаков и осадков.

**Достоверность** полученных в работе результатов обусловлена применением современной аппаратуры и **методов измерений**, математических методов обработки результатов экспериментов, а также проведением сравнительных экспериментов с применением независимых методов измерений.

**На защиту выносятся** основные положения и результаты исследований автора:

1. Результаты разработки и исследования автоматизированной СВЧ-радиометрической аппаратуры для определения влагозапаса атмосферы и

- водозапаса облаков с поверхности Земли, обоснование выбора структурных схем аппаратуры, метода СВЧ-радиометрических измерений;
2. Результаты обработки СВЧ-радиометрических данных, выполненных в различных регионах при различных метеоусловиях, над океаном и над сушей, в том числе в период развития глубокой конвекции и гроз, и предложения по использованию СВЧ-радиометрической информации в задачах прогноза опасных гидрометеорологических явлений;
  3. Результаты анализа погрешностей СВЧ-радиометрического метода определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков;
  4. Результаты исследований временной (пространственной) изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных регионах средних широт (над океаном и над сушей);
  5. Результаты оценки влияния вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков на интегральное ослабление микрорадиоволн в облачной атмосфере.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы из 186 наименований, содержит 167 страниц основного текста, 45 рисунков и 24 таблицы.

## 2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассматривается обоснование актуальности работы, сформулированы цель работы и задачи исследований, научная новизна работы и ее практическая значимость, содержание работы. Отмечена важность развития СВЧ-радиометрического метода определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, необходимость совершенствования методик и аппаратуры, актуальность проведения СВЧ-радиометрических исследований для решения прикладных задач метеорологии. Рассмотрены особенности и преимущества СВЧ-радиометрического метода дистанционного зондирования атмосферы, отмечен вклад ведущих отечественных и зарубежных организаций в развитие этого метода. Поставлена задача создания автоматизированной аппаратуры для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и проведение экспериментальных исследований временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Перечислены основные результаты, полученные автором, отмечена их значимость. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены физические основы СВЧ-радиометрического метода определения параметров атмосферы с поверхности Земли, используемые методики определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков по результатам измерений интенсивности нисходящего собственного радиотеплового излучения атмосферы. Определены основные требования к техническим характеристикам аппаратурного комплекса для определения характеристик влагосодержания атмосферы методом СВЧ-радиометрии.

В разделе 1.1. приводятся основные соотношения, описывающие перенос радиотеплового излучения в атмосфере, используемые для анализа результатов экспериментов и выработки требований к создаваемой аппаратуре. Показано, что основной вклад в излучение (поглощение) атмосферой в СВЧ-диапазоне

вносят водяной пар, кислород, жидкокапельные облака и осадки. Приведены основные соотношения для расчета микроволновых спектров поглощения и излучения радиоволн. Показано, что применение различных алгоритмов расчета радиотеплового излучения вблизи линии поглощения водяного пара 22.235 ГГц дают близкие результаты.

В разделе 1.2. сформулирована задача определения интегральных параметров атмосферы по радиотепловому излучению: влагозапаса атмосферы

$Q = \int_0^{\infty} \rho(z) \cdot dz$ ,  $\rho(z)$  - профиль абсолютной влажности, и водозапаса облаков

$W = \int_{z_1}^{z_2} w(z) \cdot dz$ ,  $w(z)$  - профиль водности,  $z_1, z_2$  - высоты верхней и нижней границ

облака. Наиболее информативные участки спектра излучения атмосферы для решения этих задач следующие: 1.6-1.9 мм, 4.2-3.0 мм, 7-9.5 мм, 12.8-14.3 мм, 20-32 мм. Для атмосферы, содержащей слоистообразные облака определение влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков осуществляется из результатов измерения характеристик радиотеплового излучения на двух частотах вблизи центра линии поглощения водяного пара 21.0 ГГц и 36.5 ГГц. Для атмосферы, содержащей мощные конвективные облака, решается однопараметрическая задача определения водозапаса облаков из измерений характеристик радиотеплового излучения атмосферы при частотах зондирования 9.3 ГГц и 36.5 ГГц. Основные факторы, оказывающие влияние на погрешность определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, следующие: погрешность алгоритмов расчета поглощения в кислороде, водяном паре, погрешность оценки температуры капельных облаков, рассеяние излучения на крупных каплях, погрешность измерения характеристик радиотеплового излучения. Приводятся соотношения, связывающие искомые параметры атмосферы  $Q$  и  $W$  с радиояркими температурами в зенитном направлении  $Tя(\lambda_1), Тя(\lambda_2)$ , ( $\lambda_1 = 14$  мм,  $\lambda_2 = 8.2$  мм):  $Q = a_0 + a_1 \cdot Тя(\lambda_1) + a_2 \cdot Тя(\lambda_2)$ ,  $W = b_0 + b_1 \cdot Тя(\lambda_1) + b_2 \cdot Тя(\lambda_2)$ . В общем случае коэффициенты регрессии  $a_i, b_i$  зависят от распределения метеоэлементов в атмосфере. Поэтому дискретный набор коэффициентов регрессии получен для различных моделей атмосферы и типичных синоптических ситуаций. Коррекция коэффициентов регрессии может осуществляться в результате итерационной процедуры и учитывает особенности текущего распределения метеопараметров атмосферы. В качестве исходной информации использовались данные радиозондирования (профили температуры, давления, влажности атмосферы) и водности облаков.

В разделе 1.3. проанализированы методы измерения характеристик радиотеплового излучения атмосферы с поверхности Земли (методы относительных угломестных/азимутальных «разрезов», метод абсолютных измерений, радиоастрономический метод). Отмечены достоинства и недостатки методов угломестных, азимутальных «разрезов» и метода абсолютных измерений. Радиоастрономический метод, основанный на регистрации угловой зависимости интенсивности излучения Солнца, позволяет определять поглощение атмосферы с погрешностью около 10%, однако, не позволяет

проводить непрерывные измерения. Для реализации непрерывных наблюдений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков предложено использовать метод временных «разрезов», основанный на регистрации нисходящего радиотеплового излучения атмосферы при фиксированном положении диаграммы направленности антенны. Получены оценки вклада различных составляющих (потери антенны, влияние поля рассеяния и радиояркого фона, погрешности измерения антенной температуры) в суммарную погрешность измерения радиояркой температуры атмосферы.

**Вторая глава** посвящена изложению принципов построения СВЧ-радиометрической аппаратуры для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Приводятся обоснование структурной схемы автоматизированной аппаратуры и описание методов калибровки СВЧ-радиометров.

В разделе 2.1. выполнен сравнительный анализ различных схем построения СВЧ-радиометров: компенсационного, модуляционного, нулевого, с пилот сигналом, представлены основные соотношения, описывающие флуктуационную чувствительность СВЧ-радиометров. Выполнен краткий обзор метеорологических СВЧ-радиометров влажностного зондирования атмосферы, приводятся их основные технические характеристики. Поставлена задача минимизации шумов антенны и потерь входного тракта, применение надежных приемных устройств, удовлетворяющих требованиям шумовых свойств, и обеспечивающих стабильность усиления.

В разделе 2.2. представлено описание созданного в ГУ «ГГО» автоматизированного СВЧ-радиометрического комплекса аппаратуры для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. В состав аппаратуры включены СВЧ-радиометрические приемные устройства, работающие на частотах 21.0ГГц (длина волны  $\lambda_1 = 14$  мм) и 36.5ГГц (длина волны  $\lambda_2 = 8.2$  мм), антенная система, и персональный компьютер. СВЧ-радиометры построены на основе супергетеродинных приемников с полосой усиления 200МГц (21.0ГГц) и 400МГц (36.5ГГц). СВЧ-радиометры построены на основе применения схемы супергетеродинного приемника, реализуют модуляционный принцип измерения, используют во входном антенно-волноводном тракте программно-управляемые СВЧ-переключатели и генераторы шума. Требуемая стабильность усиления достигается применением системы термостатирования узлов радиометра и стабилизацией питающих напряжений (токов) устройств радиометра. Флуктуационная чувствительность радиометров составляла не хуже  $0.5\text{К/с}^{0.5}$ , ширина луча диаграммы направленности по уровню 3дБ равнялась 10градусам (скалярная рупорная антенна) и 0.7 градусов (параболическая антенна). Система управления и сбора данных СВЧ-радиометрического комплекса обеспечивает управление режимами работы СВЧ-радиометров, управление антенной системой, преобразование выходных аналоговых сигналов СВЧ-радиометров в цифровой код, обработку данных. Дано описание алгоритмов управления, сбора, обработки данных.

В разделе 2.3. выполнен анализ схем построения поляризационных СВЧ-радиометров, используемых для наблюдений атмосферы, реализующих как полный поляризационный анализ (измерение 4-х параметров Стокса излучения), так и частичный анализ наиболее информативных первых двух параметров Стокса. Приводится описание СВЧ-радиометрической аппаратуры, используемой для исследования конвективных облаков. В состав аппаратуры входит поляризационный СВЧ-радиометр 36.5ГГц (длина волны  $\lambda = 8.2$  мм), на входе которого установлен электрически управляемый ферритовый переключатель Фарадея. Скалярный конический рупор, имеющий осесимметричную диаграмму направленности, используется в качестве облучателя антенной системы Кассегрена. Ширина диаграммы направленности антенны по уровню 3дБ составляет 15 угловых минут. Для калибровки поляризационного радиометра используется установленный в плоскости отражателя системы Кассегрена электрически управляемый полупроводниковый генератор шума. Мощность источника шума, приведенная ко входу СВЧ-радиометра составляет около 20К.

В разделе 2.4. систематизированы методы калибровки СВЧ-радиометров, приводятся основные соотношения, используемые при калибровке СВЧ-радиометров, выполнены оценки погрешностей используемых методов калибровки (метод угломестных “разрезов”, метод широкоапертурных излучателей при уровнях термодинамической температуры 80К и 290К, метод расчета характеристик радиотеплового излучения безоблачной атмосферы по данным синхронного радиозондирования). Погрешность калибровки для различных методов находится в пределах от 0.5 до 2 К.

Раздел 2.5. посвящен анализу результатов экспериментальных исследований радиотеплового излучения атмосферы в период международного эксперимента VALTEX. Выполнены сравнения данных синхронных измерений радиотеплового излучения атмосферы CLIWA-NET СВЧ-радиометрами различных производителей (Кабау, август 2001г). В результате дисперсионного анализа СВЧ-радиометрических данных получены количественные оценки погрешности измерений радиоярких температур различными СВЧ-радиометрами, работающими на частотах около 22.2 ГГц, 30 ГГц, 37 ГГц.

В разделе 2.6. сформулированы перспективы совершенствования СВЧ радиометрического комплекса для определения параметров атмосферы, связанные с улучшением технических характеристик, совершенствованием узлов (антенной системы, СВЧ-радиометрических приемников, системы защиты от климатических воздействий и т.д.), разработкой вопросов обеспечения единства измерений и метрологического обеспечения сетевых СВЧ-радиометрических измерений.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований атмосферы, полученные с применением наземных автоматизированных СВЧ-радиометров (длины волн 8мм/ 13.5 мм; 8 мм / 14 мм; 8 мм/ 32 мм) в различные сезоны 1989-2007гг. в Ленинградской области и весной 1990г. над океаном в районах Северной Атлантики. Основные задачи экспериментальных исследований атмосферы связаны с апробацией методик

СВЧ-радиометрического зондирования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков; исследованием временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных регионах средних широт; анализом данных комплексного (СВЧ-радиометрического и радиолокационного) зондирования атмосферы в период развития опасных гидрометеорологических явлений.

В разделе 3.1. дана краткая характеристика используемых в экспериментах средств СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы и методики наблюдений атмосферы и облаков, с помощью которых были получены ряды экспериментальных данных о временной изменчивости влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков. В соответствии с этой методикой измерения нисходящего радиотеплового излучения атмосферы осуществляется при фиксированных углах места в сочетании с методами внешней абсолютной калибровки, применены уточненные алгоритмы оценки влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. В случае наблюдений конвективных облаков для определения характеристик радиотеплового излучения использовались методики так называемых относительных угломестных и азимутальных “разрезов” атмосферы.

В разделе 3.2. приводятся результаты исследования пространственно-временной изменчивости влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различных регионах: над океаном и над сушей в средних широтах. Выполнен анализ результатов исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков над океаном, в период эксперимента «Атлантэкс-90». Анализ СВЧ-радиометрических данных показал существенное влияние синоптических процессов, протекающих в атмосфере на изменение влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в районе Ньюфаундлендской зоны океана: в интервале  $4...45 \text{ кг/м}^2$  наибольшие значения влагозапаса атмосферы отмечались в восточной части циклонов, там же отмечались и большие значения водозапаса облаков, а минимальные значения влагозапаса атмосферы наблюдались в ядрах высокого давления, формирующихся в тыловых частях циклонов. Для типичных синоптических ситуаций получены количественные оценки средних значений (СЗ) и средних квадратических отклонений (СКО) влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Проанализированы пространственные вариации влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков (на масштабах порядка 1000 км) в Северной Атлантике.

Приводятся примеры СВЧ-радиометрических наблюдений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различные сезоны для условий Ленинградской области. Получены результаты сравнений радиозондовых и радиометрических значений влагозапаса атмосферы. Установлено, что для атмосферы, содержащей слоистообразные облака без осадков, при вариациях влагозапаса атмосферы в интервале  $(2...45) \text{ кг/м}^2$ , водозапасах облаков менее  $2 \text{ кг/м}^2$  средняя квадратическая погрешность определения влагозапаса атмосферы в зените для районов исследований составляла  $(0.7...1.3) \text{ кг/м}^2$  с доверительной вероятностью 0.9.

Выполнены исследования временных и пространственных вариаций интегральных параметров атмосферы с использованием аппарата структурных

функций. Оценки средних интенсивностей временных флуктуаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков выполнены на временных масштабах от единиц минут до нескольких суток в различные сезоны года. Показано, что средние временные структурные функции влагозапаса атмосферы описываются степенной функцией:  $D_Q(\Delta t) = C_Q^2 \cdot \Delta t^\mu$ , где:  $\mu = 2/3$ . Получены оценки структурных коэффициентов:  $C_Q = 0.46 \text{ кг м}^{-2} \cdot \text{мин}^{-0.33}$  (лето),  $C_Q = 0.15 \text{ кг м}^{-2} \cdot \text{мин}^{-0.33}$  (зима). Представлены результаты исследования корреляции водозапаса облаков с влагозапасом атмосферы, позволившие выявить сезонные особенности этой зависимости.

В разделе 3.3. выполнен сравнительный анализ СВЧ-радиометрических и эмпирических (самолетное зондирование) данных о водности облаков различных типов. Полученные в различные периоды года СВЧ-радиометрические средние значения водозапаса различных типов слоистообразных облаков находятся в удовлетворительном согласии с модельными оценками водозапаса облаков, основанными на данных самолетного и радиозондирования атмосферы в Северо-Западном регионе. В частности, отмечается относительная устойчивость измеренных в теплый и холодный периоды года средних значений водозапаса слоистообразных облаков *Sc, St*, в отличие от соответствующих оценок для облаков *Ns*. Выполненный анализ сезонных и региональных особенностей статистики водозапаса (интегральных функций распределения водозапаса облаков  $P(W > X)$ ), иллюстрирует различия для теплого и холодного периодов года. В частности, показано, что в холодный период (п. Воейково) в 95% времени водозапас облаков в зените не превышал  $0.28 \text{ кг/м}^2$ , а значения водозапаса облаков, превышающие  $0.52 \text{ кг/м}^2$  регистрировались лишь в 1% случаев. Над океаном в 90% времени водозапас облаков составлял менее  $0.50 \text{ кг/м}^2$ , а в Ленинградской области в теплый период года лишь в 5% случаев водозапас облаков превышал  $0.7 \text{ кг/м}^2$ .

В разделе 3.4. проанализированы результаты исследований влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в период развития мощных конвективных облаков. Представлены основы пассивно-активного радиолокационного метода определения средней водности конвективного облака, осадков и методика наблюдений атмосферы, используемая при исследовании динамики развития конвективных (грозовых) облаков. СВЧ-радиометрические измерения на длинах волн 8.2мм и 3.2см, выполненные с помощью радиометров, работающих синхронно с метеорологическим радиолокатором МРЛ-2 ( $\lambda=3.2\text{см}$ ) позволяли определять водозапас конвективного облака (в частности, переохлажденной части облака) на различных стадиях развития, а также оценивать среднюю водность облака. Для обнаружения грозовых облаков использовался радиолокатор МРЛ-1 ( $\lambda=3.2\text{см}$ ), а координаты молний в таких облаках устанавливались радиолокационными станциями метрового ( $\lambda=200\text{см}$ ) и дециметрового диапазона ( $\lambda_1=10\text{см}$ ,  $\lambda_2=35\text{см}$ ), которые обнаруживают ионизированные каналы молний как типа облако-облако, так и облако-земля. Кроме того, грозовые разряды фиксировались грозопеленгаторами.

Выполненные комплексные эксперименты (июль 1993-1996гг, п.Тургош, Ленинградская область) подтверждают связь влагозапаса атмосферы с процессами образования и эволюции конвективных облаков. Количественные сравнительные оценки СВЧ-радиометрических СЗ и СКО влагозапаса атмосферы для периодов развития конвективных облаков разной мощности (Cu hum, Cu med и Cb, Cb грозовых) отражены в Таблице 1.

**Таблица 1.**

***Влагозапас атмосферы в период развития конвективных облаков***

		Cu hum, Cu med	Cb, Cb гр	Весь период
СЗ,	кг/м <sup>2</sup>	19,73	29,65	23,78
СКО,	кг/м <sup>2</sup>	3,17	2,93	5,97

Для стадии грозового облака характерны наибольшие значения влагозапаса, а также его значительные мезомасштабные вариации, которые в области грозового облака в отдельных случаях превышали 50% среднего значения. Эксперименты показали, что для водозапаса переохлажденной части облака характерны значительные дисперсии, существует корреляционная связь влагозапаса атмосферы и параметров конвективного облака на стадии максимального развития.

Выполнены экспериментальные оценки второго параметра Стокса радиотеплового излучения различных типов облаков и дождя при  $\lambda = 8.2$  мм: деполяризация излучения мощных конвективных облаков составляет несколько единиц К в случае осадков средней интенсивности, причем, на наклонных трассах излучение на горизонтальной поляризации превышало излучение на вертикальной поляризации. Полученные экспериментальные оценки степени деполяризации собственного излучения конвективных облаков с осадками на наклонных трассах составляет менее 3%, что согласуется с приближенными теоретическими оценками степени деполяризации излучения осадков. Вместе с тем, обнаружены аномальные (около 10К) кратковременные значения деполяризации излучения переохлажденной части грозового облака.

В разделе 3.5 предложен алгоритм использования СВЧ-радиометрической информации для сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений, связанных с развитием облаков и осадков. На основе статистического анализа СВЧ-радиометрических данных и радиолокационной информации построен региональный СВЧ-радиометрический прогностический критерий для качественного прогноза развития опасных гидрометеорологических явлений (гроз, ливней). Предварительное тестирование предложенной схемы, выполненное в Ленинградской области, п.Воейково, показало, что заблаговременность прогноза опасных явлений может составлять от 1час. до 12час., оправдываемость около 0.76.

В разделе 3.6. выполнен анализ СВЧ-радиометрического метода оценки интегральных радиохарактеристик атмосферы в микроволновом диапазоне. Получены регрессионные соотношения, связывающие интегральное ослабление на различных частотах с влагозапасом атмосферы и водозапасом облаков и

получены статистические распределения интегрального ослабления реальной атмосферы.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. На основании исследований микроволнового излучения атмосферы и выполненного анализа погрешностей измерения характеристик нисходящего радиотеплового излучения атмосферы обоснован выбор структурной схемы наземного автоматизированного СВЧ-радиометрического комплекса аппаратуры для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. В состав созданного комплекса аппаратуры включены СВЧ-радиометры, работающие на частотах около 21.0 ГГц и 36.5 ГГц, реализующие модуляционный принцип измерений, процесс сбора данных автоматизирован;
2. Усовершенствована методика определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков из результатов наземных абсолютных измерений характеристик радиотеплового излучения на двух частотах около 21.0 ГГц и 36.5 ГГц.
3. Получены оценки реальной погрешности определения интегральных параметров атмосферы из сравнительного анализа данных СВЧ-радиометрических и расчетных (радиозондовых) измерений. Средняя квадратическая погрешность определения влагозапаса атмосферы из результатов СВЧ-радиометрических измерений для случая атмосферы, содержащей слоистообразные облака без осадков, при вариациях влагозапаса атмосферы в зените  $2...45 \text{ кг/м}^2$ , для различных районов исследований составляла  $0.7...1.3 \text{ кг/м}^2$  с доверительной вероятностью 0.9.
4. Выполненный анализ СВЧ-радиометрических данных о водозапасах слоистообразных облаков обнаруживает удовлетворительное согласие средних значений водозапаса слоистообразных облаков с имеющимися эмпирическими данными о водозапасах различных видов облаков. Впервые показаны региональные (над океаном и над сушей), сезонные особенности интегральных вероятностных распределений водозапаса облаков.
5. Впервые выполнен анализ синоптических и мезомасштабных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в Северной Атлантике и в Ленинградской области при различных метеоусловиях, в том числе в период развития опасных гидрометеорологических явлений (мощные конвективные облака, грозы), и экспериментально исследованы сезонные и региональные особенности корреляционной связи между влагозапасом атмосферы и водозпасом облаков. Показано, что наибольшая корреляция между влагозапасом атмосферы и водозпасом облаков отмечается в холодный период времени, когда  $r_{ow} = 0.7$ ;
6. Получены статистические оценки вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Показано, что в предположении “замороженной турбулентности” средние структурные функции влагозапаса атмосферы в

интервале масштабов от единиц до 1000 км аппроксимируются типичным для двухразмерной турбулентности законом “степени 2/3”. Даны оценки сезонной изменчивости структурного коэффициента влагозапаса атмосферы;

7. Проанализировано влияние временных и пространственных вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков на интегральное ослабление облачной атмосферы в СВЧ-диапазоне. Получены статистические оценки интегрального ослабления реальной атмосферы при длинах волн 32...3 мм;
8. На основе анализа экспериментальных данных радиолокационного и СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы в период развития конвективных облаков разработаны рекомендации по использованию СВЧ-радиометрической информации в задаче сверхкраткосрочного прогноза опасных гидрометеорологических явлений (грозы, ливней), предложена простая модель для построения СВЧ-радиометрического прогностического критерия, сформулированы требования к системе СВЧ-радиометрического сетевого влажностного зондирования атмосферы.

#### 4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Karavayev D., Shchukin G., Stasenko V. **Multiwave active-passive sounding of atmospheric moisture. J. Physics and Chemistry of the Earth, 1998, 1p.**
2. Karavayev D.M., Shchukin G.G. **Radiophysical investigations of water vapor and cloud liquid water content. Fifth International Symposium on Atmospheric and ocean Optics. Proc. SPIE 3583,1998, p.407-413.**
3. Shchukin G.G., Egorov A.D., Karavaev D.M., Morozov V.N. **Lazer and microwave methods of cloud investigations. -Atmospheric and oceanic optics.V.19, 2006, №09, p. 703-706.**
4. **Щукин Г.Г., Караваев Д.М. Разработка критерия развития облаков и осадков с использованием радиотеплолокационных данных и радиолокационной информации.- Труды ГГО, 2008. вып.557, с.119-132.**
5. **Щукин Г.Г., Караваев Д.М., Некоторые результаты и перспективы исследований в области СВЧ-радиометрии (радиотеплолокации), проводимых в ГГО им. А.И.Воейкова.-Успехи зарубежной радиоэлектроники, 2008, №6, с.29-37.**
6. **Щукин Г.Г., Степаненко В.Д., Образцов С.П., Караваев Д.М., Жуков В.Ю., Рыбаков Ю.В., Состояние и перспективы радиофизических исследований атмосферы и подстилающей поверхности. -Труды ГГО, 2009, вып.560, с. 143-167.**
7. **Караваев Д.М., Щукин Г.Г., СВЧ-радиометрические исследования влаго-водосодержания атмосферы в период развития конвективных облаков и гроз. Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы. 2010, Спецвыпуск, с.53-58.**
8. **Гальперин С.М., Караваев Д.М., Стасенко В.Н., Щукин Г.Г., Исследование электроактивных зон в облаках в интересах установления их связи с градовыми процессами. Тезисы докладов Всероссийской конференции по**

- физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, КБР, 1997, с.83-86.
9. Караваев Д.М., Попова Н.Д., Щукин Г.Г. СВЧ-радиометрическое зондирование влагосодержания атмосферы. Тезисы докладов II научной конференции "Применение дистанционных радиофизических методов в исследовании природной среды. М., 1992, с. 159-160.
  10. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Радиофизические исследования характеристик влагосодержания атмосферы. Тезисы докладов III научной конференции "Применение дистанционных радиофизических методов в исследовании природной среды. Муром, 1999, с.57-58.
  11. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Влагозапас атмосферы и водозапас облаков по данным СВЧ-радиометрических измерений.-Труды НИЦ ДЗА, "Прикладная метеорология", вып.1 (546), 1997, с. 6-13.
  12. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Результаты исследования влагозапаса атмосферы в период образования конвективных облаков. Тезисы докладов XVIII Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Москва, 1996г, с.95-96.
  13. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. СВЧ-радиометрические исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Тезисы докладов региональной XXIII конференции по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, 1997, с.76.
  14. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Радиометрические исследования ослабления микроволн в тропосфере. Тезисы докладов региональной IV конференции по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, 1998, с.42.
  15. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. СВЧ-радиометрические исследования интегральных радиохарактеристик атмосферы. Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции по распространению радиоволн, Казань, 1999, 2с.
  16. Караваев Д.М., Рыбаков Ю.В., Щукин Г.Г., Валидация сетевых СВЧ-радиометров в период VALTEX. Тезисы докладов региональной 8 конференции по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, октябрь 2002, с.46-47.
  17. Караваев Д.М., Рыбаков Ю.В., Щукин Г.Г. СВЧ-радиометрические измерения характеристик влагосодержания атмосферы в период метеозащиты С-Петербурга 30-31 мая 2003г. Тезисы докладов региональной 9 конференции по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, октябрь 2003, с.72-73.
  18. Караваев Д.М., Рыбаков Ю.В., Щукин Г.Г., Разработка метеорологической сети СВЧ-радиометров. Тезисы докладов региональной 10 конференции по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, октябрь 2004, с.85-86.
  19. Щукин Г.Г., Кутуза Б.Г., Дорожкин Н.С., Загорин Г.К., Караваев Д.М., Образцов С.П., Рыбаков Ю.В., Собачкин А.А. Многоволновое СВЧ-радиометрическое зондирование атмосферы. -Труды НИЦ ДЗА, "Прикладная метеорология", вып.4(552), 2002.с.87-104.

20. Тарабукин И.А., Караваев Д.М., Попова Н.Д., Щукин Г.Г. Автоматизированное пассивно-активное зондирование облачной атмосферы. -Труды ГГО. Экспериментальная метеорология, 1995, вып.545, с.53-60.
21. Щукин Г.Г., Стасенко В.Н., Образцов С.П., Караваев Д.М. Проект 2.7. Дистанционное исследование малых газовых составляющих атмосферы, влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и осадков на основе применения методов СВЧ-радиометрии и активной локации. Физика микроволн, т.1, РАН ИПФ, Новгород, 1996, с.128-136.
22. Щукин Г.Г., Стасенко В.Н., Образцов С.П., Караваев Д.М., Проект 2.7. Дистанционное исследование малых газовых составляющих атмосферы влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и осадков на основе применения методов СВЧ-радиометрии и активной локации. Сб. отчетов по научным проектам МНТП России за 1996г, Физика микроволн, Москва, 1997, с.68-71.
23. Щукин Г.Г., Стасенко В.Н., Образцов С.П., Караваев Д.М. Проект 2.7. Дистанционное исследование малых газовых составляющих атмосферы влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и осадков на основе применения методов СВЧ-радиометрии и активной локации. Сб. отчетов по научным проектам МНТП России за 1997г. Физика микроволн, Н.Новгород, 1998, с.85-89.
24. Г.Г.Щукин, В.Н.Стасенко, С.П.Образцов, Д.М.Караваев Проект 2.7. Дистанционное исследование малых газовых составляющих атмосферы влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков и осадков на основе применения методов СВЧ-радиометрии и активной локации. Сб. отчетов по научным проектам МНТП России, Физика микроволн, Н.Новгород, 1999, с.150-156.
25. Г.Г.Щукин, В.Д.Степаненко, А.Д.Егоров, С.М. Гальперин, Д.М.Караваев Радиофизические исследования атмосферы и подстилающей поверхности. Юбилейный сб."Современные исследования Главной геофизической обсерватории" к 150-летию со дня основания. т.1.С-Пб, Гидрометеиздат, 1999, с.172-190.
26. Karavayev D.M., Popova N.D., Shchukin G.G. Some results of atmospheric moisture sounding. Proceedings of specialist meeting on microwave radiometry and remote sensing applications. Boulder, Colorado, USA, Jan.1992, p.404-407.
27. Stasenko V., Galperin S.M., Karavayev D., Shchukin G. Investigations of electric and microphysic properties of a thundercloud using active-passive multiwave radar system. Proc. WMO workgroup on measurements of cloud properties for forecast of weather and climate, Mexico city, 23-27 June 1997, WMO/ td № 852, p.271.
28. Караваев Д.М., Щукин Г.Г., Применение методов СВЧ-радиометрии для диагноза содержания жидкокапельной влаги в облаках. -Труды НИЦ ДЗА, "Прикладная метеорология", 2004. вып.5 (553), с 99-120.
29. Гальперин С.М., Караваев Д.М., Козлов В.Н., Морозов В.Н., Щукин Г.Г., Обнаружение смерчей с помощью пассивно-активной радиолокации.

Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 70-летию Эльбрусской Высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, М., ЛКИ, 2008, с.55-62.

30. Щукин Г.Г., Караваев Д.М., Применение радиотеплолокационного метода определения влаго-водозапаса атмосферы в задаче сверхкраткосрочного прогноза облаков и осадков. Труды Всероссийской XXII конференции по распространению радиоволн. Т.3, 2008, Ростов на Дону, с.98-100.
31. Щукин Г.Г., Караваев Д.М., Применение наземного СВЧ-радиометрического метода зондирования атмосферы в задаче сверхкраткосрочного прогноза облаков и осадков. Всероссийская научная школа и конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». 2009г., Муром, с.103-106.
32. Караваев Д.М., Щукин Г.Г., Применение метода СВЧ-радиометрии в задаче регионального сверхсрочного прогноза опасных явлений погоды и наукастинга. Всероссийские научные конференции- чтения памяти Н.А.Арманда. 2010г., Муром, с.137-141.