

На правах рукописи

**Косторная Анжелика Андреевна**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ И  
ВОДОЗАПАСА ОБЛАКОВ ПО ДАННЫМ РОССИЙСКИХ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (ФГБУ «НИЦ «Планета»).

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук **Рублев Алексей Николаевич**, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», заместитель директора

**Официальные оппоненты:** **Заболотских Елизавета Валериановна**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», ведущий научный сотрудник **Лукьянов Александр Николаевич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральная аэрологическая обсерватория», заведующий лабораторией

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

Защита диссертации состоится 1 декабря 2021 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета Д 327.003.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123242, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11–13.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru>

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук



М.В. Шатунова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Вода в атмосфере существует в трех агрегатных состояниях: жидком (вода), твердом (лед) и газообразном (водяной пар). Общее количество воды в столбе воздуха определяет характер радиационного обмена, влажностного и теплового режимов. Для оценки запаса водяного пара в вертикальном столбе безоблачной атмосферы единичного сечения используется величина влагосодержания. Для оценки общей массы сконденсированной воды (капель и кристаллов) в столбе облачной атмосферы используется величина водозапаса.

На сегодняшний день существует множество теоретических и экспериментальных работ, связанных с изучением пространственно-временных распределений водяного пара и микрофизических параметров облачности. Для оперативного определения характеристики влажности в различных районах земного шара используются спутниковые методы. Как указано в работе С.П. Образцова, типичные средние погрешности восстановления влагосодержания и водозапаса по спутниковым измерениям – 15 % и 23 % соответственно.

При определении водозапаса облачности спутниковыми методами применяются ее количественные и качественные характеристики, восстановленные по измерениям в каналах видимого (ВД), инфракрасного (ИК) и ближнего ИК (БИК) диапазонов. Для оценки влагосодержания, средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), как правило, используется измеренное поглощение водяного пара в различных диапазонах спектра. Микроволновое (МКВ) излучение, регистрируемое спутником, чувствительно к типу и состоянию земного покрова. Вследствие этого определение водозапаса атмосферы в основном проводится над морской поверхностью, спектральная излучательная способность которой хорошо известна и существует целый ряд эмпирических зависимостей для ее вычисления в зависимости от угла наблюдения, скорости ветра и солености воды.

Отечественные космические аппараты (КА) серии «Метеор-М» имеют в своем составе комплект измерительной аппаратуры, в который входят МКВ радиометр МТВЗА-ГЯ (Модуль Температурно-Влажностного Зондирования Атмосферы) и сканер МСУ-МР (Многозональное Сканирующее Устройство Малого Разрешения). Радиометр МТВЗА-ГЯ принимает собственное излучение Земли и атмосферы в 29 спектральных каналах, в том числе в полосах поглощения кислорода и водяного пара (52 – 57 ГГц и 183 ГГц) предназначенных для определения температурно-влажностной структуры атмосферы. МСУ-МР обеспечивает получение изображений в шести спектральных каналах с длинами волн от 0,6 до 12 мкм с высоким (1 км при наблюдении в надир) пространственным разрешением, что позволяет определять балл и геометрическую структуру облачности. Таким образом,

имеется возможность комплексного использования бортовой целевой аппаратуры КА серии «Метеор-М» для влажностного зондирования атмосферы – детектирования и определения микроструктуры облаков с помощью сканера МСУ-МР и восстановления общего содержания водяного пара по данным радиометра МТВЗА-ГЯ. В связи с этим важной и актуальной задачей является разработка методик для определения влагосодержания атмосферы и водозаписа облаков, применимых к аппаратуре отечественных КА серии «Метеор-М».

Результаты полученного по спутниковым данным пространственного распределения водяного пара, геометрических структур, фазового состава и водозаписа облаков могут быть использованы в алгоритмах, описывающих возникновение и эволюцию облачности, прогноз интенсивности, а также начала и окончания выпадения осадков.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является разработка методик определения влагосодержания атмосферы и водозаписа облаков по данным приборов, устанавливаемых на КА серии «Метеор-М».

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ существующих методик определения водозаписа облаков и влагосодержания атмосферы.
2. Разработка методики определения влагосодержания безоблачной атмосферы по спутниковым данным применительно к приборам КА серии «Метеор-М».
3. Модификация существующей методики определения водозаписа облачности, использующей спутниковые измерения.
4. Валидация методик определения значений водозаписа и влагосодержания по независимым данным (наземная наблюдательная сеть, наземные радиолокационные измерения, спутниковые измерения, численные прогнозы погоды (ЧПП) и модельные данные).
5. Программная реализация представленных в работе методик.

### **Научная новизна**

1. Создана методика определения влагосодержания безоблачной атмосферы, использующая измерения прибора МТВЗА-ГЯ КА серии «Метеор-М», в которой выбор каналов подбирается для различных климатических зон и типов поверхности.

2. Разработана модификация алгоритмов детектирования облачности и определения ее характеристик в соответствии с международной морфологической классификацией Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) для использования в оперативных подразделениях Гидрометцентра России.

3. Впервые разработана методика автоматического попиксельного сравнения облачных параметров, восстановленных двумя различными технологиями обработки спутниковых данных, осуществляющая временное и пространственное совмещение, учет смещения облачных массивов, а также расчет статистических характеристик и оценок.

### **Научная и практическая значимость**

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 11.10.2016 модифицированные автором алгоритмы детектирования облачности и определения ее характеристик были внедрены в оперативную практику СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» в качестве основных. ЦМКП Росгидромета признано целесообразным использование результатов расчетов модифицированных автором алгоритмов в оперативно-прогностической работе метеоподразделений как дополнение данных синоптических и радиолокационных наблюдений в региональных и мезомасштабных схемах численного анализа и прогноза погоды, для наукастинга, а также в целях климатических исследований облачного покрова и осадков.

На модифицированные автором алгоритмы детектирования облачности и определения ее характеристик, а также на методику автоматического сравнения облачных параметров получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2018666179 от 13.12.2018, № 2020611170 и № 2020611177 от 24.01.2020, № 2020611499 от 03.02.2020). Разработанные автором методики валидации по независимым данным введены в оперативную и опытную эксплуатацию СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета», что подтверждается соответствующими актами.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика определения влагосодержания безоблачной атмосферы по измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, позволяющая проводить адаптивный поиск оптимального набора каналов.

2. Модификации алгоритмов детектирования облачности и определения ее характеристик, использующих спутниковые измерения в каналах ВД, БИК и ИК диапазонов.

3. Методика автоматического попиксельного сравнения качественных и количественных характеристик облачного покрова, восстановленных двумя различными технологиями обработки данных радиометров полярно-орбитальных спутников.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: XI Международный форум «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», Международная научная

конференция «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» (Новосибирск, 2015); Всероссийская конференция «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (Усть-Сема, 2015); 13-ая Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2015); Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS 2016 (Томск, 2016); 14-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2016); XXIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2016); IV Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли (РП-ДЗЗ 2017)» (Красноярск, 2017); III Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи и перспективы развития Российской космонавтики» (Томск, 2017); Международная конференция «The Eighth Asia / Oceania Meteorological Satellite Users Conference (AOMSUS-8)» (Владивосток, 2017); XXV рабочая группа «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2018); Международный научный конгресс «ИнтерЭкспо ГеоСибирь-2019» (Новосибирск, 2019); VI Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, 2019); Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019)» (Бердск, 2019).

Результаты диссертационной работы докладывались на технических совещаниях в ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» (Новосибирск, 2015, 2016) и ФГБУ «Обь Иртышского УГМС» (Омск, 2016), методическом совещании-семинаре ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» (Новосибирск, 2017) и Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам ЦМКП Росгидромета (Москва, 2016).

### **Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных выводов подтверждается их сравнением с независимыми данными и исследованиями других авторов, а также публикациями в рецензируемых периодических изданиях, широким обсуждением на различных (российских и международных) конференциях и семинарах.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 23 работы, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных в действующем перечне Высшей аттестационной комиссией (ВАК), 16 публикаций в материалах международных, всероссийских, научно-практических и региональных

конференциях, получено 4 свидетельства РОСПАТЕНТА о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Личный вклад автора**

1. Анализ существующих методик определения водозапаса облаков и влагосодержания атмосферы, литературных источников.

2. Основная роль в разработке методики определения влагосодержания безоблачной атмосферы, модификации алгоритмов детектирования облачности и расчета ее параметров и разработке методики автоматического попиксельного сравнения облачных параметров, восстановленных двумя различными системами обработки спутниковых данных.

3. Участие в работах по программной реализации полученных методик для оперативной обработки спутниковых данных вместе с соавторами статей, лежащих в основе диссертации.

4. Основная роль в разработке методик валидации восстановленных значений водозапаса и влагосодержания и проведении валидации по независимым данным.

5. Участие в подготовке и написании научных статей, в подготовке и представлении докладов на научных конференциях и семинарах.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 212 наименования и 5 приложений. Общий объем диссертации составляет 141 страницу. Диссертация содержит 42 рисунка и 13 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, аргументирована новизна исследований, показана практическая и научная значимость работы, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** диссертации приводятся основные определения параметров влажности атмосферы, особенности распределения воды в различных агрегатных состояниях в зависимости от времени года и географического района, спектральные особенности ее взаимодействия с ИК и МКВ излучением, а также проводится анализ методов определения характеристик атмосферы по данным ДЗЗ.

**В разделе 1.1** описаны основные свойства воды и особенности переноса влаги в атмосфере. Приведены закономерности вертикального и горизонтального распределения водяного пара. На основе анализа литературных источников установлено, что основное содержание водяного пара отмечается у подстилающей поверхности до высоты 7 – 9 км. Перечислены основные гигрометрические величины, рекомендованные ВМО.

В **разделе 1.2** рассмотрены радиационные свойства облачности и интегральные микроструктурные параметры облака, характеризующие объем частиц в нем (водность, лёдность, водозапас). Как показано, например, в работах Матвеева Л.Т., Седунова Ю.С. и др., водозапас облака зависит от целого ряда факторов: расположения относительно подстилающей поверхности, вертикального градиента температуры, типа и мощности облака и пр.

В **разделе 1.3** описаны особенности взаимодействия излучения различных длин волн с водяным паром. Приводятся физические принципы определения влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков по измерениям в ИК и МКВ областях электромагнитного спектра.

**Раздел 1.4** рассматривает методы моделирования переноса ИК и МКВ излучения в земной атмосфере. Решение *прямой* задачи предполагает определение величины излучения на верхней границе атмосферы при заданных параметрах атмосферы и излучающей поверхности. Решение *обратной* задачи позволяет по регистрируемой прибором величине интенсивности излучения восстанавливать различные геофизические параметры атмосферы и подстилающей поверхности.

В **разделе 1.5** проанализированы существующие методы определения влажностных характеристик по данным дистанционного зондирования. Приводятся условия классификации методов оценки величин влагосодержания и водозапаса в зависимости от используемого диапазона длин волн.

В **разделе 1.6** описаны технические характеристики и принципы действия бортовой целевой аппаратуры КА серии «Метеор-М». Приборы спутников серии «Метеор-М» работают в различных областях электромагнитного спектра, что позволяет проводить оценки одновременного содержания водяного пара и облачной воды в атмосфере.

Анализ литературы показал, что для приборов спутников серии «Метеор-М» отсутствуют надежные, прошедшие валидацию по наземным и аэрологическим измерениям, методики определения влагосодержания, а методики определения водозапаса необходимо адаптировать для использования в конкретном регионе.

Во **второй главе** рассмотрены разработанные и модифицированные автором методики определения водозапаса облаков и влагосодержания безоблачной атмосферы.

В **разделе 2.1** описаны алгоритмы Algorithm Working Group (AWG) для детектирования облачности и определения ее характеристик по спутниковым данным. Автором предложены модификации этих алгоритмов для соответствия с международной морфологической классификацией облачности ВМО и расчета водозапаса.

Алгоритмы AWG используют измерения в каналах 0,65 мкм, 0,8 мкм, 1,61 мкм, 3,7 мкм, 11 мкм и 12 мкм и включают в себя:

1. Обнаружение облачности и построение маски облачности. Алгоритм основан на байесовском классификаторе, после выполнения



которого, с помощью пороговых значений апостериорной вероятности формируется четырехуровневая маска облачности со значениями: ясно, возможно ясно, облачно и возможно облачно.

2. Определение типа облачности и фазового состояния ее частиц. Каждый пиксель облачной маски классифицируется в одну из семи категорий: туман, облака капельного строения (подразделяются на «теплые» и «холодные» по значениям яркостной температуры в канале 11 мкм), облака смешанного строения (состоящие из воды и льда), конвективная облачность (развитые по вертикали, оптически плотные облака), многослойная облачность (состоящая из нескольких ярусов) и перистая облачность.

3. Определение параметров верхней границы облачности (ВГО). Используя измеренное радиометром уходящее тепловое излучение в каналах прозрачности атмосферы (11 мкм и 12 мкм), происходит восстановление значений температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) и высоты (км) ВГО с помощью априорных данных.

4. Расчет оптических и микрофизических свойств облака. Для пикселей с солнечным зенитным углом не менее  $65^{\circ}$  определяются оптическая плотность облака ( $\tau$ ) и эффективный радиус частиц ( $r_e$ ) в мкм. Алгоритм основан на стандартном биспектральном подходе к оценке величин ( $\tau$ ) и ( $r_e$ ), использующем каналы 0,65 мкм и 3,7 мкм. Значения параметров восстанавливаются с помощью регрессионной зависимости. Входными данными алгоритма являются значения температуры, содержание водяного пара и озона по высотам на долготно-широтной сетке в  $2,5^{\circ}$  (атмосферные профили, распространяемые центром NCEP), результаты расчетов прошлых алгоритмов (облачная маска, информация о фазовом состоянии облачных частиц и температуре ВГО) и таблицы априорных значений оптических параметров облака (коэффициенты излучения, отражения и пр.).

Следует отметить, что рассчитанные с помощью алгоритмов AWG типы облачности не включают в себя принятые морфологические классы ВМО, используемые в оперативно-прогностической работе метеоподразделений. Автором предложено дополнительное разделение облачности на классы по мощности, использующее величину водозапаса. Модификация алгоритмов включает в себя:

1. Оценку количества воды в капельном облаке и кристаллов льда в ледяном облаке с использованием параметров LWP и IWP ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) соответственно. Вычисление LWP и IWP осуществляется на основе значений ( $\tau$ ) и ( $r_e$ ) по опыту работ Wood R. и Heymssfield A.J.

2. Проведение подробной морфологической классификация облаков. Разделение облачности на классы в соответствии с их мощностью (таблица 1) происходит с помощью порогового метода. Для рассчитанных ранее характеристик облачности установлены пороговые значения, выбранные на основе статистических данных для Сибирского региона, справочной литературы, а также с учетом пороговых значений и разделений классов облачности комплексной пороговой методики (КПМ), разработанной Волковой Е.В.

3. Уточнение значений водозапаса (LWP / IWP) в соответствии с полученными классами облачности и мощностью облака. В работах Волковой Е.В., Wood R. и пр., указано, что ошибки определения LWP / IWP возрастают для кучевообразной и многослойной облачности. Поэтому для полученных классов (таблица 1) были установлены предельно допустимые значения водозапаса, характерные для типов облачности, входящих в него. Если рассчитанное для пикселя значение водозапаса не соответствует заданному для класса интервалу, то пикселу присваивается значение водозапаса, основываясь на рассчитанных для него параметрах облачности в соответствии со статистической выборкой данных и литературой.

Таблица 1 – Полученные классы облачности и входящие в них типы

Класс облачности	Входящие формы облачности
Ci + Cb	Многослойная облачность, верхний ярус над облачным слоем более низкого яруса (Cu, Cb, Ns)
Ci + med	Многослойная облачность, верхний ярус над средним или нижним ярусом (St, As, Sc, Ac)
Ci; Cs	Класс перистообразных (Ci, Cs, Cc)
Cu; Ac	Преимущественно Ac, отдельные маломощные Cu, или плотные As
Cu; Sc	Преимущественно Sc, небольшой мощности Cu, иногда Ac
Ns; Cb	Ns, мощные Cu, мало развитые по вертикали Cb (Cb hum)
St; As	As (в теплое время года), St, низкие Ac, Sc
Low + As	Многослойная облачность, нижний ярус – Ns, St, Sc, Cu под As, реже Ac
Cb cap; Cb calv	Помимо указанных, могут включать в себя также мощные Cu
Cb inc	Кучево-дождевые облака с наковальней

С помощью скорректированной величины водозапаса возможно проведение дальнейших расчетов, например, максимальной возможной интенсивности осадков по методу, описанному у Gayfulin D. и Roebeling R.A.

В разделе 2.2 описана методика определения влагосодержания безоблачной атмосферы по спутниковым измерениям в МКВ-диапазоне.

Излучение атмосферы (или подстилающей поверхности) на частоте  $\nu$ , регистрируемое прибором на орбите, определяется известным выражением:

$$I_{\nu}(\nu) = \varepsilon_{\nu} B_{\nu}(T_s) \tau_{\nu}(0, p_s) + \int_0^{p_s} B_{\nu}(T) W_{\nu}(p) \frac{dp}{p}, \quad (1)$$

где  $I_{\nu}$  – уходящее излучение системы Земля – атмосфера;  $\varepsilon_{\nu}$  – излучательная способность поверхности;  $B_{\nu}$  – функция Планка;  $T_s$  – температура поверхности земли;  $\tau_{\nu}$  – коэффициент прозрачности атмосферы;  $p_s$  – давление у поверхности земли;  $W_{\nu}$  – весовая функция, которая характеризует вклад излучения различных уровней атмосферы и будет зависеть от пропускающей способности атмосферы.

Кроме водяного пара значительный вклад в величину поглощения и излучения вносит облачность. Для восстановления общего содержания водяного пара используются отдельно методики восстановления водозапаса облака и методики, восстанавливающие количество водяного пара в безоблачной атмосфере. При этом к методическим ошибкам определения

общего содержания водяного пара добавляются ошибки определения маски облачности.

Поскольку пространственное разрешение СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ от 10 до 100 км в зависимости от канала, а случай обширных безоблачных территорий – тривиальный, будем рассматривать ситуации, когда пиксель частично заполнен облачностью. Суммарное излучение пикселя МТВЗА-ГЯ будет складываться из излучения безоблачных и облачных участков. При определении влагосодержания столба атмосферы проводится фильтрация облачности и учитывается излучение только безоблачных участков пикселя:

$$I_{pix}^* = (S' - S_{cloud}) * I_{clear} + S_{cloud}^* * I_{clear}, \quad (2)$$

где  $S'$  – площадь всего пикселя;  $S_{cloud}$  – площадь участков, закрытых облачностью;  $I_{clear}$  – излучение безоблачных участков;  $S_{cloud}^*$  – площадь кромок облаков. Сложность заключается в определении четкой границы облака. Ошибки в определении маски облачности будут вносить ошибку в величину суммарного излучения пикселя и, в свою очередь, в восстановленное значение влагосодержания. Зная степень покрытия пикселя облаками (балл облачности,  $B = \frac{S_{cloud}}{S'}$ ), можно отсеять площади, покрытые облачностью, однако это не отменит наличие ошибки вблизи кромок:

$$I_{pix} = S'(1 - B)I_{clear} + B * S' * S_{cloud}^* * I_{cloud}. \quad (3)$$

Ошибку величины принятого излучения с безоблачных участков, связанную с использованием маски облачности, можно выразить следующим образом:

$$\delta I_{pix} \sim - \frac{I_{pix}}{(1-B)^2} dB. \quad (4)$$

Отсев облачных пикселей возможен на основе результатов сравнения  $I_{pix} > h$  с заданным пороговым значением  $h$ , а усреднение ошибки  $\delta I_{pix}$  будет происходить за счет объема выборки: при его увеличении ошибка определения среднего значения влагосодержания будет уменьшаться.

Восстановление влагосодержания производится на основе регрессионной зависимости. В отличие от подходов известных методик предлагается использовать в качестве предикторов не отдельные каналы, чувствительные к влагосодержанию в условиях безоблачной атмосферы, а набор каналов, реагирующих на наличие облачности и газовых составляющих. Выбор  $k$  каналов осуществляется из всех 29 каналов МТВЗА-ГЯ, которые можно использовать в качестве предикторов регрессии. Таким образом, разработка методики определения влагосодержания атмосферы по данным измерений радиометра МТВЗА-ГЯ включает в себя два этапа:

- поиск типа зависимости и значимых предикторов;
- оценка точности восстановленных значений влагосодержания в столбе безоблачной атмосферы.

Для поиска оптимального числа предикторов принималось во внимание, что для получения достоверных данных количество каналов и степень полинома не могут быть большими, так как это уменьшает число степеней

свободы в уравнениях регрессии. Для проведения факторного анализа требуется набор данных, охватывающий возможный диапазон изменений исследуемой величины. Априорные значения влагосодержания должны обеспечивать необходимый интервал изменений параметра для условий реальной атмосферы.

Выбор вида уравнения регрессии для определения зависимости величины влагосодержания от измеренных значений яркостной температуры каналов ( $x_{in}$ ) производился из полиномов первого и второго порядков:

$$W_n = a_0 + \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^m (a_{i+k} * x_{in}), \quad (5)$$

$$W_n = a_0 + \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^m (a_i * x_{in} + a_{i+k} * x_{in}^2), \quad (6)$$

где  $W_n$  – влагосодержание в точке n, рассчитанное по априорным данным;  $a_i$  – коэффициенты регрессии; m – количество точек; k – набор каналов. Решение уравнений 5 и 6 проводилось методом наименьших квадратов:

$$A = (X^T * X)^{-1} * X^T * W, \quad (7)$$

где A – вектор коэффициентов  $a_i$ ; X – матрица значений факторов. Ошибки оценивались по значению среднеквадратического отклонения после расчета остаточной суммы квадратов:

$$D = W^T * W - A^T * X^T * W. \quad (8)$$

Априорные значения влагосодержания столба атмосферы ( $\text{кг/м}^2$ ) рассчитывались, используя следующие выражения:

$$\rho_l = \frac{\mu}{R} * \frac{P_l}{T_l}, \quad (9)$$

$$W_l = \rho_l * \frac{S_l}{10^6} * \frac{\mu_{\text{вп}}}{\mu}, \quad (10)$$

где l – уровень атмосферы, для которого производится расчет;  $\mu = 0,02896 \text{ кг/моль}$  – молекулярная масса сухого воздуха;  $R = 8,31441 \text{ Дж/моль} * \text{К}$  – универсальная газовая постоянная;  $P_l$  – давление (Па);  $T_l$  – температура (К);  $W_l$  – влагосодержание ( $\text{кг/м}^3$ );  $\rho_l$  – парциальная плотность ( $\text{кг/м}^3$ );  $S_l$  – массовая доля водяного пара (ppm);  $\mu_{\text{вп}} = 0,018 \text{ кг/моль}$  – молекулярная масса водяного пара.

Влагосодержание столба атмосферы ( $\text{кг/м}^2$ ) рассчитывалось путем численного интегрирования:

$$W_n = \sum_l \left[ (h_l - h_{l+1}) * \left( \frac{W_l - W_{l+1}}{2} \right) \right], \quad (11)$$

где  $h_l$  и  $h_{l+1}$  – верхняя и нижняя границы рассматриваемого слоя воздуха (м).

Выбор значимых предикторов, их количество и степени полинома для регрессионного соотношения осуществлялось двумя способами: с помощью подобранной комбинации каналов в соответствии с работами Караваева Д.М., Образцова С.П., Bobylev L.P., K Mitnik L.M. и с помощью адаптивного поиска, который был автоматизирован и включал в себя следующие шаги:

1. Выбор k из n предикторов методом перебора. Для этого количество предикторов последовательно варьировалось от 3 до 7. Количество возможных комбинаций, в зависимости от априорных данных, составило  $2,5 * 10^5 - 5 * 10^5$ .

Рассматривались случаи, когда в качестве предикторов ( $x_{in}$ ) использовались либо значения яркостных температур в каналах прибора, либо рассчитанные из них эффективные оптические толщины атмосферы ( $\tau'_i$ ) для  $i$ -го канала:

$$\tau'_i = -\ln\left(\frac{r_i}{r_i^*}\right), \quad (12)$$

где  $r_i$  – интенсивность принятого на спутнике излучения в канале  $i$ ;  $r_i^*$  – рассчитанная по функции Планка интенсивность излучения, которую зарегистрировал бы датчик от абсолютно черного тела с температурой  $T$  с поправкой на коэффициент излучения земной поверхности в соответствии с классификацией Международной программы по геосфере и биосфере (IGBP):

$$r_j^* = \frac{\varepsilon * c_1 * v^3}{\left(\exp\left(\frac{c_2 * v}{T}\right) - 1\right)}, \quad (13)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  константы ( $0,1191 * 10^{-7}$  и  $1,43868$  соответственно);  $v$  – частота излучения ( $\text{см}^{-1}$ );  $T$  – яркостная температура  $j$ -го канала, лежащего в окне прозрачности атмосферы. Частота  $i$ -го канала измерения, которая используется в (12) для расчета  $\tau'_i$ , должна находиться на границе полосы поглощения водяного пара, т.е. эффективная оптическая толщина  $\tau'_i$  должна быть меньше единицы. В противном случае, ее вычисление по закону Бугера-Ламберта в (12) из-за собственного излучения водяного пара сопровождается большими ошибками. Дополнительно в качестве предикторов использовались температуры на уровне подстилающей поверхности, высотах 5, 10 км и др.;

2. Расчет коэффициентов регрессии для каждого сочетания предикторов  $k$  (уравнения 7 – 10);

3. Расчет среднеквадратической ошибки отклонения линии регрессии в пересчете на одну степень свободы по формуле:

$$STD = \sqrt{\frac{D}{n-m}}, \quad (14)$$

где  $m$  – количество коэффициентов в выбранной регрессии (5) или (6);

4. Выбор набора предикторов, для которых среднеквадратическое отклонение (14) минимально.

В результате предложенные автором методики определения водозапаса облачной и влагосодержания безоблачной атмосферы позволяют использовать измерения бортовой целевой аппаратуры КА серии «Метеор-М».

**Третья глава** посвящена валидации модифицированной методики определения водозапаса облаков по независимым данным. Наземными средствами для больших территорий водозапас не измеряется и данных, которые могли бы использоваться для валидации его оценок, нет. Поскольку расчет величины водозапаса по предлагаемой автором методике напрямую зависит от точности восстановленных параметров облачного покрова, валидация проводилась для характеристик облачности, участвующих в расчете – морфологической классификации, температуры и высоты ВГО.

Исходными данными для определения значений водозапаса облаков являлись измерения радиометра AVHRR (Advanced Very-High-Resolution

Radiometer), установленного на КА серии NOAA и Metop-B. Прибор AVHRR является аналогом радиометра МСУ-МР, расположенного на отечественных КА серии «Метеор-М». Поэтому результаты валидации применимы для МСУ-МР.

В разделе 3.1 рассмотрены результаты сравнения рассчитанных характеристик облачности с данными наземной наблюдательной сети и измерениями КА CALIPSO (лидар CALIOP). При сопоставлении с данными метеонаблюдений параметры облачности показали высокую достоверность. В синоптическом масштабе – на картах прослеживаются облачные массивы фронтов, ложбин, гребней, теплых секторов циклонов и пр. В мезомасштабе – типы и формы облачности совпадают с указанными на станциях в большинстве случаев, в том числе и по косвенным признакам (например, областям ливневых осадков соответствуют кучево-дождевые или слоисто-дождевые формы). Однако, поскольку наземные оценки форм облачности несут в себе значительное количество ограничений, связанных с квалификацией и опытом наблюдателя, углом обзора и пр., а визуальное сопоставление карт параметров облачности с синоптическими картами проводится с большим количеством допущений, эта валидация носит качественный характер.

Для количественной оценки восстановленных параметров ВГО (высоты и температуры) проводилось сопоставление с аналогичными оценками по данным лидара CALIOP КА CALIPSO по опыту работ Heidinger A.K. и Redemann J. Лидар CALIOP позволяет получать параметры облачных и аэрозольных слоев с вертикальным разрешением – 30 м и горизонтальным – 1 км. Для анализа информации с КА CALIPSO и КА серии NOAA осуществлялось их временное и пространственное совмещение. Проведенное за 2014 г. для территории России сравнение показало наибольшую точность расчета параметров ВГО для слоистообразной и кучевообразной облачности, наименьшую – для перистых типов. Максимальная достоверность восстановленных параметров ВГО отмечается в теплый период года – с апреля по сентябрь. Расхождения высоты ВГО составляют не более 1,5 км, а температуры – не более 5 – 10 К.

В разделе 3.2 приведены результаты валидации классификации облачности и значений высоты ВГО, рассчитанных по данным КА NOAA-19, NOAA-18 и MetOp-B, по измерениям Доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ-С) Барабинск. Сравнение проводилось Западно-Сибирским филиалом ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» с 1.05.2015 по 11.05.2016 в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве. Учитывая особенности и ограничения радиолокационного метода, специалистами привлекалась вспомогательная информация: синоптические, кольцевые карты, карты нефанализа и торговая погода.

Анализировались данные за 211 дней, было произведено 546 сравнений данных по высоте ВГО и 384 сравнения классификации облачности. Количество сроков с полным соответствием данных методики данным

ДМРЛ-С составляет 83,1 %. Количество сроков с полным расхождением в данных составляет 1,3 %. Типы облачности на картах классификации методики совпадают с типами облачности ДМРЛ-С в среднем в 96,9 % случаев. Значения высоты ВГО определяются с достоверностью в среднем 80,2 %. При рассмотрении по месяцам наибольшее качество восстановления параметров облачности отмечается в теплый период года с апреля по сентябрь (Рисунок 1). В зимнее время на 6 % уменьшается точность определения типов облачности и на 19 % точность определения высоты ВГО.

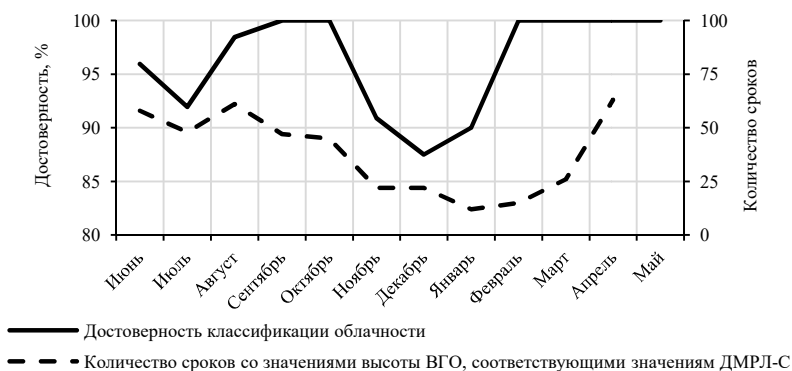


Рисунок 1 – Результаты сравнений расчетов модифицированной автором методики с данными ДМРЛ-С Барабинск за период с 1.05.2015 по 11.05.2016 г.

Одна из причин уменьшения достоверности в зимний период состоит в том, что снежный покров, из-за высокого альбеда может быть ошибочно принят за облачность. Повторяемость сроков с ложным детектированием составляет 1,6 % от общего числа произведенных наблюдений. Выявлены условия погоды, при которых методика имеет тенденцию к ложному детектированию облачности.

В разделе 3.3 описана предлагаемая автором методика автоматического сравнения параметров облачного покрова, восстановленных двумя различными технологиями обработки спутниковых данных. Использование измерений различных КА и разные алгоритмы обработки спутниковой информации приводят к разным результатам. Поэтому необходимо сопоставление получаемых оценок облачных параметров для определения их достоверности.

Предлагаемая методика приводит данные к одной пространственной сетке, производит поиск соответствия пикселей на классифицированных спутниковых данных, сравнивает качественные и количественные характеристики облачности, рассчитывает статистические оценки. Сравнение производится на выбранной территории проведения испытаний и в выбранный интервал времени, при котором наблюдение выбранного участка двумя КА считается одновременным. Для учета смещения облачных массивов и поиска

фрагментов изображений одних и тех же участков облачного поля из массива сравниваемых данных выбираются окрестности  $k \times k$  пикселей контрольного массива и  $n \times n$  пикселей валидируемого, который используется в качестве скользящего окна. Для каждого сдвига скользящего окна строится бинарная матрица соответствия ( $M_{i,j}$ ), которая является функцией от контрольной ( $M_A$ ) и валидируемой ( $M_B$ ) матриц:

$$M_{i,j} = f(M_A[i,j], M_B[i+k, i+l]), \quad (15)$$

где  $i, j$  – координаты пикселя,  $k, l$  – шаг смещения скользящего окна. Функция  $f$  – присваивает элементу матрицы  $M_{i,j}$  значение 1 при совпадении параметра облачности соответствующих элементов матриц  $M_A$  и  $M_B$  и 0 – в противном случае. Пиксель валидируемого массива считается соответствующим пикселю контрольного, когда значение  $r$  в окрестности  $k \times k$  максимально:

$$r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{i,j}. \quad (16)$$

В отсутствии максимума участки снимка совмещаются по координатам.

Для применения КПМ на территории Западной Сибири проводилась ее валидация. Методика детектирования облачности и расчета ее характеристик, адаптированная автором для территории Сибири, использовалась в качестве контрольной. Проводилось сравнение однотипных параметров облачного покрова с помощью описанной технологии.

В качестве исходной спутниковой информации методиками используются измерения радиометров со схожими техническими характеристиками, но установленных на разных полярно-орбитальных КА (МСУ-МР / «Метеор-М» №2 и AVHRR / NOAA и Metop-B). Сравнение проводилось на территории Западной Сибири, ограниченной  $49^\circ - 66^\circ$  с. ш. и  $60^\circ - 95^\circ$  в. д.

Для проведения временного и пространственного совмещения из 1927 имеющихся пар снимков для сравнения было выбрано 212 пар с удовлетворительной коллокацией, когда разница по времени составляла не более 7 минут, а облачный параллакс не превышал 9 км. Поиск корреляции осуществлялся по соответствию четырех классов фазового состояния облачных частиц, рассчитанных по сравниваемым методикам. Размер окна поиска соответствия составлял  $9 \times 9$  пикселей ( $k = 9$ ) при размере скользящего окна  $3 \times 3$  пикселя ( $n = 3$ ). Для найденных соответствующих пикселей проводилось сравнение оценок эффективного радиуса облачных частиц ( $r_{ef}$ ), оптической плотности ( $\tau$ ), температуры ( $t$ ) и высоты ( $h$ ) ВГО за период 01.03. – 30.11.2019 г. Аналогично поиск соответствия пикселей проводился для сравнения с использованием найденных классов облачности.

В результате сопоставления получено: наибольшее соответствие двух методик отмечается при детектировании кристаллической облачности, наименьшее – при детектировании капельной (Рисунок 2); при детектировании классов наибольшее соответствие методик отмечается для многослойной облачности разных ярусов и кучево-дождевой. Вместе с тем стандартные



отклонения оценок ( $t$ ) и ( $h$ ) за исследуемый период составили 6,2 К и  $\sim 1$  км; среднее соответствие оценок ( $\tau$ ) и ( $r_{ef}$ ) максимально в теплый период года и составило 37 % и 26 %.

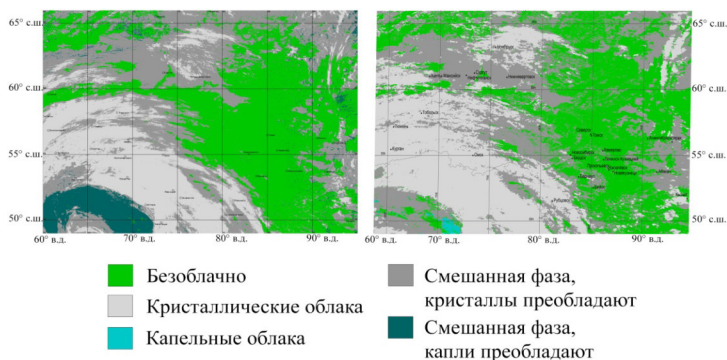


Рисунок 2 – Пример сравниваемых фрагментов: фазовое состояние облачных частиц, 28.03.2019 г.; слева – по оценкам КПМ (МСУ-МР / «Метеор-М», 14:38 UTC); справа – по оценкам методики, предложенной автором (AVHRR / NOAA, 14:39 UTC)

Проведенное сопоставление показало, что КПМ при обработке данных МСУ-МР КА «Метеор-М» №2 дает завышенные оценки температуры (и, соответственно, заниженные высоты) верхней границы облаков, расположенных или достигающих верхнего яруса тропосферы (перистая облачность, мощные кучево-дождевые облака). Совместно с разработчиками прибора было установлено, что причиной этого является ограничение ( $\sim 230$  К) динамического диапазона ИК каналов прибора со стороны низких температур. Позднее этот недостаток был устранен на приборе МСУ-МР КА «Метеор-М» №2-2 и последующих приборах серии, динамический диапазон ИК каналов которых расширен до 190 К.

В **четвертой главе** изложены результаты валидации предложенной автором методики определения влагосодержания безоблачной атмосферы по данным измерений МТВЗА-ГЯ.

**Раздел 4.1** посвящен сравнению восстановленных оценок влагосодержания по модельным данным МТВЗА-ГЯ с профилями атмосферы М. Matricardi. Набор из 80 профилей создан на основе базы данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) и включает в себя точки для различных климатических зон, охватывая почти весь наблюдаемый в природе диапазон изменения температуры атмосферы и концентраций газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ . В каждом профиле содержится информация о дате замера, широте и долготе, давлении у подстилающей поверхности (гПа), типе подстилающей поверхности (вода, снег, пустыня, лес

и пр.), давлении (гПа), температуре (К) и концентрации  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CO$  и  $CH_4$  (ppmv) для 101 уровня атмосферы.

В качестве исходных данных для получения регрессий на основе выражений (5) – (8) использовались вертикальные профили температуры и влажности, температуры и излучательная способность подстилающей поверхности. Значения влагосодержания атмосферы рассчитывались интегрированием модельных профилей концентрации  $H_2O$ . Диапазон значений влагосодержания по профилям атмосферы М. Matricardi колеблется в интервале от 0 до  $85 \text{ кг/м}^2$ .

Моделирование яркостных температур (К) или интенсивности излучения ( $\text{милливатт/см}^{-1}/\text{стер/м}^2$ ) в каналах прибора МТВЗА-ГЯ проводилось с помощью быстрых радиационных моделей (БРМ), созданных по аналогии с моделями RTTOV (Radiative Transfer for TOVS) (Matricardi, 2008). Получение БРМ осуществлялось на основе результатов расчетов точной полиномиальной модели LBLRTM (The Line-By-Line Radiative Transfer Model) версии 12.2 с помощью программного комплекса SatRas – совместная разработка НИЦ «Планета» и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Полученные БРМ позволяют учитывать особенности вертикальных профилей температуры и водяного пара, наличие в атмосфере других газов, аэрозолей, параметры подстилающей поверхности и геометрию обзора прибора.

При подборе значимых предикторов на основе частот, используемых в известных методиках, итоговое количество предикторов составило девять – яркостные температуры каналов 10,6V, 18,7V, 31,5V, 36,7V, 52,8V, 53,8V, температура воздуха у подстилающей поверхности ( $t_{n,n}$ ) и на высотах 5,5 и 10 км ( $t_5, t_{10}$ ). Минимальное СКО отмечается для полинома первого порядка (уравнение 5) –  $3,99 \text{ кг/м}^2$ , а средняя относительная ошибка – 58 %. Несмотря на это среднее значение модуля абсолютного отклонения для некоторых профилей достигает неприемлемых значений. Кроме того, для использования в качестве предикторов помимо яркостных температур в 6 каналах МТВЗА-ГЯ значений  $t_{n,n}$ ,  $t_5$ ,  $t_{10}$  необходимы метеопараметры из баз наземной наблюдательной сети или данных ЧПП, соответствующие времени съемки, что увеличивает время обработки спутниковых данных.

При адаптивном поиске предикторов из всего набора МКВ-каналов минимальное СКО для полинома второй степени (уравнение 6) составило  $2,19 \text{ кг/м}^2$ . С целью уменьшения влияния ошибок, связанных с неопределенностью состояния атмосферы (вариации температуры, излучательной способности земной поверхности и т.п.), все модельные значения яркостных температур каналов МТВЗА-ГЯ были пересчитаны с помощью (12) в оптические толщины атмосферы, используя в (13) яркостную температуру, измеренную в первом канале МТВЗА-ГЯ (длина волны  $0,36 \text{ см}^{-1}$  в окне прозрачности атмосферы), в качестве температуры подстилающей поверхности. Комбинация из 5-и предикторов (оптические толщины атмосферы на длинах волн 18,7V, 36,7V, 52,8V, 91,65V, 183+7V) полинома

второго порядка дает меньший разброс относительной ошибки, чем при аппроксимации полиномом первого порядка (Рисунок 3). Для профилей высоких широт с влажностью до  $3 \text{ кг/м}^2$  увеличение относительной ошибки объясняется малостью самой измеряемой величины.

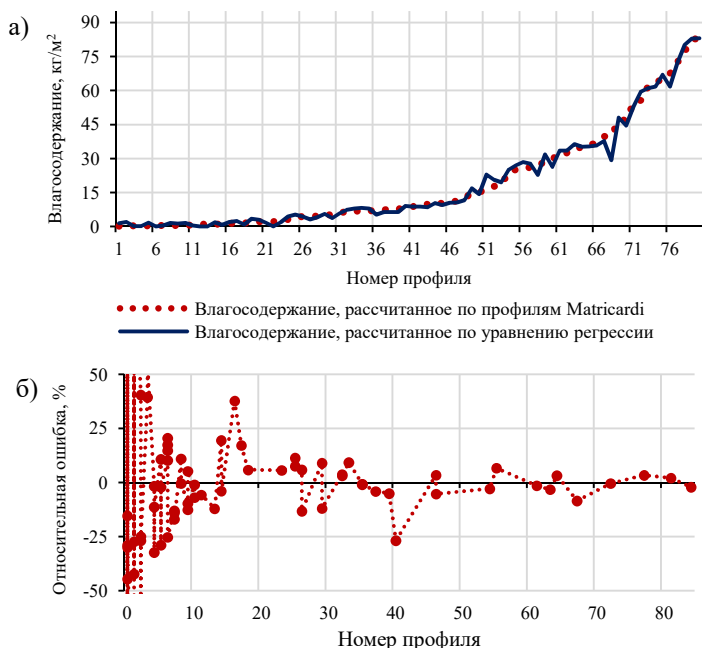


Рисунок 3 – Результаты расчетов с использованием полинома второго порядка (уравнение 6) и адаптивного поиска комбинации предикторов;  
 а) ранжированные по возрастанию значения влагосодержания ( $\text{кг/м}^2$ ), рассчитанные по уравнению регрессии и профилям М. Matricardi;  
 б) относительная ошибка (%)

В разделе 4.2 приводятся результаты сравнения значений влагосодержания ( $\text{кг/м}^2$ ), рассчитанных по данным реанализа NCEP, с восстановленными по реальным измерениям прибора МТВЗА-ГЯ за период 2016 – 2017 гг. Проект реанализа «NCEP / NCAR Reanalysis Project» содержит постоянно обновляемые архивы глобальных атмосферных полей. Реанализ выполняется с использованием глобальной спектральной модели T62. Данные NCEP поставляются на регулярной сетке  $0,25^\circ - 0,5^\circ$ . Для каждой точки сетки имеются значения параметров поверхности (температура, давление, соленость, скорость приводного ветра) и температурно-влажностный профиль на 31 уровне давления.

Для проведения сравнения была сформирована выборка данных измерений МТВЗА-ГЯ и реанализа NCEP за 2016 – 2017 гг. Создание выборки включало в себя:

- проведение предварительной внешней калибровки значений яркостных температур по модельным данным, в соответствии с рекомендациями Глобальной космической системы взаимных калибровок ВМО (GSICS), и фильтрацию пикселей;
- моделирование яркостных температур в каналах прибора МТВЗА-ГЯ в ПК Satras;
- пространственное и временное совмещение пикселей МТВЗА-ГЯ с узлами сетки NCEP по степени близости;
- фильтрацию облачных пикселей и пикселей, расположенных над поверхностью суши, с помощью критерия, предложенного Zabolotskikh E.:

$$I = \frac{(36,7_V - 36,7_H) * 100}{36,7_V + 36,7_H}, \quad (15)$$

где  $36,7_V$  и  $36,7_H$  – яркостные температуры в каналах 36,7 ГГц вертикальной и горизонтальной поляризацій. При  $I > 20$  пиксель считается морским и свободным от облачности. Дополнительно для уточнения наличия облачности использовались каналы влажностного зондирования 183 ГГц, весовые функции которых, как установлено в работе Gayfulin D., имеют максимумы на высотах около 1, 3 и 5 км.

Так как излучательная способность различных поверхностей суши даже внутри определенного класса IGBP меняется значительно, то для оценки потенциальной точности определения влагосодержания атмосферы по данным реанализа NCEP использовались участки морских поверхностей. Излучение поверхности океана задавалось параметризацией. В выборку вошли 11794 точки, расположенные над безоблачными участками водных акваторий. Диапазон значений влагосодержания составил 15 – 53 кг/м<sup>2</sup>. Поиск значимых предикторов и нахождение коэффициентов уравнения регрессии осуществлялось по учебному набору из 720 точек, наиболее полно охватывающих общий разброс значений влагосодержания.

По учебной выборке найдена комбинация 6 предикторов для уравнения регрессии второго порядка, включающая яркостные температуры канала поглощения водяного пара 18,7 ГГц, трех каналов поглощения кислорода (53 – 57 ГГц) и каналов прозрачности атмосферы (36,7 ГГц и 91,65 ГГц). СКО для полинома второй степени составило 2,09 кг/м<sup>2</sup> для учебной выборки и 5,3 кг/м<sup>2</sup> – для всей выборки (Рисунок 4).

Проверка найденной комбинации предикторов проводилась с использованием метода машинного обучения «Случайный лес» (Random forest). При его реализации для полной выборки из 11794 точек и найденной комбинации из 6-и каналов получившееся СКО (1,560 кг/м<sup>2</sup>) ниже, чем при использовании других комбинаций, что подтверждает целесообразность использования адаптивного поиска для нахождения оптимального набора предикторов.

Применение методики определения влагосодержания безоблачной атмосферы к данным прибора МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» №2-2, запущенного 5.01.2019 г., показало ошибку восстановления не более  $5 \text{ кг/м}^2$  для различных участков морской поверхности, что отвечает требованиям ВМО к определению общего содержания водяного пара. Известно, что получение количественных параметров атмосферы по спутниковым измерениям напрямую зависит от точности внутренней и внешней калибровки прибора.

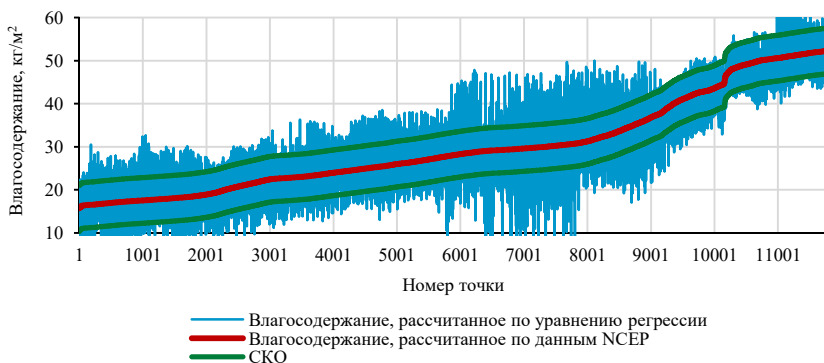


Рисунок 4 – Распределение значений влагосодержания, рассчитанных по уравнению регрессии (6) и по данным NCEP для выборки из 11794 точек, ( $\text{кг/м}^2$ )

В **заключении** изложены наиболее важные результаты работы и перспективы дальнейших исследований.

### **К основным результатам работы относятся:**

1. Методика определения влагосодержания безоблачной атмосферы по измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, позволяющая проводить адаптивный поиск оптимального набора каналов и находить наилучшие комбинации для различных климатических зон и типов поверхности. Включение каналов, в том числе с частотами, не относящимися к линиям поглощения водяного пара, в состав предикторов регрессии позволяет уменьшить величину ошибки. При сравнении значений влагосодержания, рассчитанных по профилям концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  моделей M. Matricardi и реанализа NCEP для безоблачных участков водных акваторий, с восстановленными по измерениям прибора МТВЗА-ГЯ, СКО составляют  $2,19 \text{ кг/м}^2$  и  $5,3 \text{ кг/м}^2$  соответственно.

2. Модифицированные алгоритмы AWG детектирования облачности и определения ее характеристик для использования в оперативных подразделениях Гидрометцентра России. Расчет водозаписа производится на основе параметров облачности. Установлены средние значения достоверности величин, участвующих в расчете водозаписа: для типов облачности порядка

97 %, для высоты ВГО – около 80 %. Наилучшее качество восстановления параметров облачности отмечается для апреля – сентября. Повторяемость ложного детектирования облачности составляет 1,6 % случаев.

3. Методика автоматического попиксельного сравнения параметров облачности, восстановленных различными технологиями обработки спутниковых данных. Сопоставление получаемых оценок необходимо для определения их достоверности. Предлагаемая методика учитывает смещение облачных массивов и производит поиск соответствия пикселей на классифицированных спутниковых данных. Применение методики для сопоставления шести однотипных параметров облачного покрова, рассчитанных с помощью модифицированных автором алгоритмов и КПМ, показало, что КПМ при обработке данных МСУ-МР КА «Метеор-М» №2 дает завышенные оценки температуры верхней границы облаков, расположенных выше 6 – 7 км. Причиной этого и соответствующего занижения высот ВГО является ограничение динамического диапазона ИК каналов МСУ-МР КА «Метеор-М» №2 со стороны низких температур.

4. Разработанные методы позволяют повысить точность определения характеристик влажности (водозапас и влагосодержание) по данным приборов отечественных КА серии «Метеор-М». Полученные результаты работы могут быть использованы для анализа и валидации результатов моделирования пространственного распределения интегрального влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков различными гидродинамическими моделями, используемыми в ФГБУ «Гидрометцентр России». Методики детектирования облаков и определения их водозапаса предполагается реализовать в оперативных алгоритмах обработки данных от бортовой целевой аппаратуры (МТВЗА-ГЯ и МСУ-МР) КА серии «Метеор-М».

В приложениях представлены пороговые значения для классификации облачности, используемые в разработанной методике для детектирования облачности, а также копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и актов внедрения разработанных методик в оперативную и опытную эксплуатацию СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета».

### **Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК:**

1. **Косторная А. А.** Метод дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным / А.А. Косторная, Е.И. Сапрыкин, М.Г. Захватов, Ю.В. Токарева // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 12. – С. 16 – 24.

*В переводной версии журнала:*

**Kostornaya A. A.** A method of cloud detection from satellite data / A.A. Kostornaya, E.I. Saprykin, M.G. Zakhvatov, Yu.V. Tokareva // Russian meteorology and hydrology. – 2017. – V. 42. – № 12. P. – 753 – 758.

2. **Косторная А. А.** Определение влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям микроволнового радиометра

МТВЗА-ГЯ / А.А. Косторная, Р.А. Рублев, В.В. Голомолзин // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 83 – 98.

3. Волкова Е. В. Определение параметров облачного покрова системами автоматической обработки спутниковых данных / Е.В. Волкова, **А.А. Косторная**, Р.А. Амикишиева // Географический вестник. – 2020. – № 3. – С. 124 – 134.

Содержание диссертации также отражено в следующих публикациях:

4. Антонов В. Н. Первичные результаты внедрения технологии по распознаванию типов и характеристик облачности / В.Н. Антонов, М.Г. Захватов, **А.А. Косторная** // Сборник материалов XI Международного форума «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск, 13–22 апреля 2015 г. – 2015. – Т. 2. – С. 34 – 38. УДК 528.852.

5. Антонов В. Н. Обзор технологии получения карт облачных продуктов на основе данных AVHRR. Валидация первичных результатов с использованием синоптической информации и данных CALIPSO / В.Н. Антонов, М.Г. Захватов, **А.А. Косторная** // Сборник трудов Всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов». Усть-Сема, 24–28 августа 2015. – 2015. – С. 146 – 151.

6. **Kostornaya A.** Using the automatic system of cloud detection based on satellite information for the problem of the synoptic conditions analysis / A. Kostornaya, V. Antonov, M. Zakhvatov // International conference on environmental observations, modeling and information systems ENVIROMIS. Томск, 11–16 июля 2016. – 2016. – Р. 118. – ISBN 978-5-89702-362-2.

7. **Косторная А. А.** Методика дешифрирования облачного покрова на спутниковых изображениях / А.А. Косторная, Е.И. Сапрыкин, М.Г. Захватов, Ф.В. Пяткин, Е.Ю. Сахарова // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тезисы докладов. Москва, 14–18 ноября 2016 г. – 2016. – С. 171. – ISBN 978-5-00015-007-8.

8. **Косторная А. А.** Дешифрирование облачности и расчет ее характеристик на основе данных спутникового радиометра AVHRR / А.А. Косторная, М.П. Шагаев, Е.И. Сапрыкин, Ф.В. Пяткин, М.Г. Захватов, Е.Ю. Сахарова // XXIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докладов. Томск, 29 ноября – 2 декабря 2016 г. – 2016. – С. 74 – 75. – УДК 551.508.

9. **Косторная А. А.** Результаты испытания методики дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным / А.А. Косторная, М.Г. Захватов, Ю.В. Токарева // Информационный сборник № 44. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и

методов гидрометеорологических прогнозов. Под ред. канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. Обнинск: ИГ-СОЦИН. – 2017. – С. 158 – 170.

10. **Косторная А. А.** Методика попиксельной автоматической классификации облачного покрова и восстановления его количественных характеристик по данным измерений радиометра AVHRR / А.А. Косторная, И.В. Рублев, Д.Ю. Беляев, И.А. Соловьева // Сборник докладов Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Орбита молодежи» и перспективы развития Российской космонавтики». Томск, 18–22 сентября, 2017 г. – 2017. – С. 27 – 28.

11. **Косторная А. А.** Метод дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным / А.А. Косторная, М.Г. Захватов, Ф.В. Пяткин, Е.Ю. Сахарова // Сборник тезисов международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика (МСАРД-2017)». Санкт-Петербург, 27–30 июня 2017 г. – 2017. – С. 134 – 135.

12. **Косторная А. А.** Методика распознавания облачности и восстановления ее количественных характеристик по спутниковым данным / А.А. Косторная, М.Г. Захватов, Е.Ю. Сахарова, Ф.В. Пяткин // Материалы IV международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли (РП-ДЗЗ 2017)». Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. – 2017. – С. 127 – 130.

13. **Косторная А. А.** Методика идентификации и классификации облачности на ИК-космических изображениях / А.А. Косторная, М.Г. Захватов, Ф.В. Пяткин, Е.Ю. Сахарова // Современные проблемы географии и геологии. Материалы IV всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Томск, 16–19 октября 2017 г. – 2017. – Т. II. – С. 85 – 88.

14. **Косторная А. А.** Восстановление интегральной величины влагосодержания безоблачной атмосферы по данным микроволнового зондировщика МТВЗА-ГЯ (КА МЕТЕОР-М №2) / А.А. Косторная, В.В. Голомолзин, А.Н. Рублев, М.Г. Захватов, Ф.В. Пяткин // XXV рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Тезисы докладов. Томск, 27–30 ноября 2018 г. – 2018. – С. 89.

15. Пяткин Ф. В. Применение регрессионного анализа для расчетов по данным приборов ИКФС-2 И МТВЗА спутника «МЕТЕОР-2» / Ф.В. Пяткин, В.В. Голомолзин, А.А. Косторная // Международный научный конгресс «ИнтерЭкспо Гео-Сибирь 2019». Сборник материалов. Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г. – 2019. – Т. 4. – С. 3 – 10. – DOI: 2618-981X-2019-4-1.

16. **Косторная А. А.** Восстановление интегрального влагосодержания безоблачной атмосферы над океаном по данным микроволнового зондировщика МТВЗА-ГЯ (КА МЕТЕОР-М №2) / А.А. Косторная, В.В. Голомолзин, А.Н. Рублев, С.С. Кузьминых, Ф.В. Пяткин // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды – 2019». Севастополь, 12–13 сентября 2019 г. – 2019. – С. 18.



17. Волкова Е. В. Детектирование облачности и восстановление ее параметров по данным сканеров МСУ-МР (КА МЕТЕОР-М №2) и AVHRR (КА NOAA-18, 19, МЕТОР-В) над территорией Западной Сибири / Е.В. Волкова, **А.А. Косторная** // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VI международной научной конференции. Красноярск, 10–13 сентября 2019 г. – 2019. – С. 75 – 77.

18. Волкова Е. В. Сопоставление двух методик определения параметров облачного покрова по данным сканера МСУ-МР (КА МЕТЕОР-М №2) и AVHRR (КА NOAA-18, 19, МЕТОР-В) / Е.В. Волкова, **А.А. Косторная**, В.В. Голомолзин, С.А. Кузьминых, Р.А. Амикишиева // Сборник трудов конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019)». Бердск, 26–30 августа 2019 г. – 2019. – С. 273 – 276.

19. Дубровская О. А. Анализ метеорологической ситуации в период мониторинга лесных пожаров и задымления на территории СФО в 2019 году / О.А. Дубровская, И.А. Соловьева, И.А. Мартынова, **А.А. Косторная**, И.В. Рублев, А.Е. Воронова // Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса». Москва, 11–15 ноября 2019 г. – 2019. – С. 85.

#### **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

20. **Косторная А. А.** Программный комплекс автоматической обработки и построения карт облачности «ruPlanetaMeteor2» / А. А. Косторная, Р. А. Амикишиева // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018666179 от 13.12.2018.

21. **Косторная А. А.** Программный комплекс автоматизированной классификации облачного покрова по спутниковым данным / А. А. Косторная // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020611170 от 24.01.2020.

22. **Косторная А. А.** Программный комплекс автоматизированного расчета водозапаса и максимальной мгновенной интенсивности осадков / А. А. Косторная, Р. А. Амикишиева // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020611177 от 24.01.2020.

23. **Косторная А. А.** Программный комплекс автоматического сравнения параметров облачного покрова / А. А. Косторная, Р. А. Амикишиева // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020611499 от 03.02.2020.