

На правах рукописи



**Нгуен Тонг Там**

**Диагностика фазового состояния тропосферных  
облаков по спутниковым данным**

Специальность 25.00.30 — метеорология, климатология,  
агрометеорология

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2017

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики атмосферы (ЭФА) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (ФГБОУ ВО «РГГМУ») Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент

**Чукин Владимир Владимирович**

Официальные оппоненты: **Астафуров Владимир Глебович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск,

**Волкова Елена Викторовна**,

кандидат географических наук, старший научный сотрудник,

ФГБУ «НИЦ «Планета», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»)

Защита состоится «18» мая 2017 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.197.01 на базе Российского государственного гидрометеорологического университета в первом корпусе РГГМУ по адресу: **195196, РФ, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98, конференц-зал ЛСО, тел.: +7 (812) 372-50-92**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: <http://www.rshu.ru/university/dissertations/>

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу: **192007, РФ, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.01, Ученому секретарю.**

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Д 212.197.01, к.ф.-м.н., доцент  Кашлева Лариса Владимировна

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Как известно, тропосферные облака состоят из капель воды и кристаллов льда. Оценка фазового состояния облаков является актуальной задачей, поскольку кристаллы льда в облаках играют важную роль, влияя на гидрологический цикл путем стимулирования выпадения осадков и радиационный баланс посредством изменения отражательных свойств облаков. Кристаллические частицы в облаке можно рассматривать с двух сторон: с одной стороны они имеют более высокое альbedo, с другой стороны, кристаллы льда могут спровоцировать выпадение осадков, что приводит к исчезновению облака и уменьшению альbedo. Содержание кристаллов льда зависит от географических, метеорологических факторов, а также от содержания аэрозолей в воздухе, концентрация которых может меняться как во времени, так и в пространстве. Отсутствие оперативной информации о фазовом состоянии облаков является ограничивающим фактором для точного прогнозирования развития облаков и выпадения осадков. Получение подобной информации повысит точность прогнозов погоды и оценок региональных изменений климата.

Для получения оперативной информации необходимо использование спутниковых данных с высоким пространственным и временным разрешением. Устанавливаемый на геостационарных спутниках серии MSG прибор SEVIRI имеет 12 спектральных каналов в диапазоне длин волн от 0.56 до 14.4 мкм, осуществляет сканирование подстилающей поверхности каждые 15 мин. и отвечает предъявляемым требованиям. Первые три канала прибора регистрируют преимущественно отраженное солнечное электромагнитное излучение. Отраженная солнечная радиация несет информацию об оптических свойствах подстилающей поверхности и атмосферы. Предлагаемый в данной работе алгоритм определения оптических свойств облачной атмосферы основан на их зависимости от высоты Солнца, которая меняется с течением времени, и постоянстве альbedo подстилающей поверхности.

**Целью** диссертационной работы является разработка метода оценки фазового состояния тропосферных облаков по спутниковым данным.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- разработать численную модель рассеяния электромагнитных волн облачными каплями воды и кристаллами льда;
- реализовать программно модель облачной атмосферы для осуществления решения прямой задачи дистанционного зондирования атмосферы;

- разработать и реализовать программно алгоритм определения облачных пикселей на спутниковых изображениях;
- разработать алгоритм определения оптической толщины облаков;
- осуществить диагностику фазового состояния смешанных облаков по спутниковым данным;
- провести верификацию полученного метода определения фазового состояния облаков с привлечением экспериментальных данных.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) алгоритм первичной обработки спутниковых данных;
- 2) методика определения облачных пикселей на спутниковых изображениях;
- 3) алгоритм определения оптической толщины облаков;
- 4) результаты определения фазового состояния облаков.

### **Научная новизна** исследования заключается в следующем:

- алгоритм определения облачных пикселей на спутниковых изображениях;
- алгоритм определения оптической толщины облаков по спутниковым данным;
- результаты диагностики фазового состояния облаков на основе данных спутникового прибора SEVIRI.

### **Теоретическая значимость**

По сравнению с известными спутниковыми методами диагностики параметров облаков, данное исследование имеет принципиальную особенность, связанную с диагностикой фазового состояния смешанных облаков, основанную на различии взаимодействия кристаллов льда и капель воды с электромагнитным излучением.

### **Практическая значимость**

Оперативная информация о фазовом состоянии облаков может служить дополнительным параметром при прогнозе выпадения осадков. Информация о фазовом состоянии облака может использоваться при выборе способа активных воздействий на облака. На основе получаемых данных возможна разработка дистанционного метода диагностики обледенения летательных аппаратов. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе в дисциплине "Экспериментальная физика аэрозолей".

**Обоснованность и достоверность** изложенных в работе результатов определяется использованием стандартных, апробированных и протестированных методов и процедур, сопоставлением и согласием с экспериментальными данными.

### **Апробация работы**

Основные положения и отдельные результаты исследования обсуждались на XV Всероссийской научной конференции студентов-

радиофизиков (2011), XVI Международной школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (2012), VIII Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» (2012), Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2012, 2014, 2015), итоговой сессии Ученого совета РГГМУ (2012, 2013, 2014), Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (2015). Автор является стипендиатом Института космических исследований РАН в 2015 году.

**Личный вклад** автора заключается в разработке модели взаимодействия электромагнитных волн с облачными частицами, алгоритмов выделения облачных пикселей на спутниковых изображениях и дистанционного определения параметров облаков, а также в их программной реализации.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 2 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации **127** страниц текста с **46** рисунками, **20** таблицами и **5** приложениями. Список литературы содержит **94** наименования.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** рассмотрены физические основы условий образования тропосферных облаков, их основные параметры, методы зондирования облаков. Особое внимание обращено на рассмотрение диэлектрических и микрофизических свойств облачных частиц. К основным характеристикам облаков относятся: вертикальная мощность и пространственная протяженность; микрофизические свойства; альbedo, оптическая толщина облаков; водность, ледность облаков; водозапас, льдозапас облаков; фазовое состояние облаков.

Для численного моделирования радиационных свойств облаков необходимо учитывать их микрофизические свойства и диэлектрические характеристики облачных частиц. При моделировании диэлектрических свойств облачных частиц используется модель диэлектрических свойств воды и льда. На рисунке 1 представлена зависимость показателя преломления и поглощения воды и льда от длины электромагнитных волн.

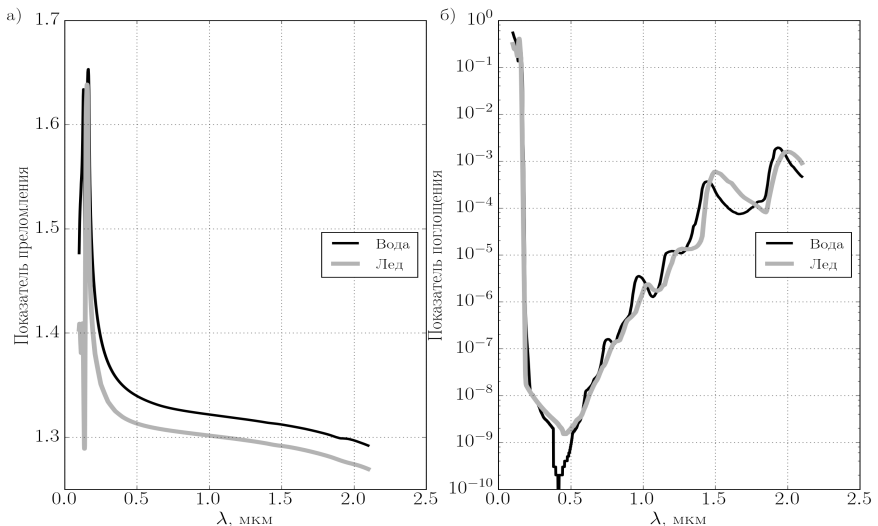


Рис. 1: Зависимость показателя преломления (а) и поглощения (б) воды и льда от длины ЭМВ

Из рисунка 1 видно, что в диапазоне длин ЭМВ от 0.5 до 2.0 мкм показатель преломления воды больше показателя преломления льда, в диапазоне 0.5 – 1.0 мкм показатель поглощения воды больше показателя поглощения льда, а в диапазоне 1.5 – 1.8 мкм показатель поглощения льда уже значительно больше показателя поглощения воды. Исходя из этого нами была поставлена задача разработки метода определения фазового состояния облаков на основе различия поглощения в диапазоне 1.5 – 1.8 мкм.

Исследование характеристик облаков представляет собой одну их важных задач в метеорологии. В разделе 1.4 рассматриваются методы зондирования облаков: самолетный, аэрологический, лидарный, радиолокационный и спутниковый. В рамках данной работы для зондирования тропосферных облаков был выбран спутниковый метод зондирования с целью оценки фазового состояния смешанных облаков.

**Вторая глава** посвящена обзору современных метеорологических спутниковых систем. В условиях относительно ограниченной плотности сети локальных наблюдений в ряде стран, как на суше, так и над океанами, и необходимости получения глобальной информации о состоянии атмосферы и поверхности с высокой периодичностью и пространственным разрешением, измерения дистанционными методами становятся регулярным и часто важнейшим видом наблюдений характеристик атмосферы и земной поверхности. Спутниковые наблюдения имеют значительную роль в климатических исследованиях, а также в изучении закономерностей разнообразных процессов и явлений, происходящих в системе атмосфера-поверхность, и потоков электромагнитного и корпускулярного излучения, приходящих на верхнюю границу атмосферы. Над океанами ИСЗ являются, в большинстве случаев, важнейшими источниками информации.

В разделе 2.1 рассмотрены технические характеристики и назначения полярно-орбитальных метеорологических спутников МЕТЕОР-М №2, NOAA-19 и МЕТОР-В.

В разделе 2.2 рассмотрены технические характеристики и назначения геостационарных метеорологических спутников ЭЛЕКТРО-Л1, GOES-14 и МЕТЕОСАТ-10.

Спутники MSG (МЕТЕОСАТ второго поколения) разработаны с применением новых технологий на основе успешного опыта использования первых спутников серии МЕТЕОСАТ. Радиометр SEVIRI, установленный на спутнике MSG, имеет 12 каналов, которые позволяют получать изображения поверхности Земли каждые 15 минут. Канал высокого разрешения в видимом диапазоне имеет разрешающую способность 1 км, остальные каналы - 3 км. Кроме радиометра SEVIRI, на спутнике также установлен прибор

для измерения радиационного баланса Земли GERB, телекоммуникационное оборудование для передачи исходных и обработанных изображений и оборудование для приема и ретрансляции сигналов бедствия (GEOSAR).

В разделе 2.3 рассмотрены бортовые спутниковые приборы и их технические параметры: многозональное сканирующее устройство - геостационарное (МСУ-ГС), установленное на геостационарном метеорологическом спутнике ЭЛЕКТРО-Л1; радиометр AVHRR, установленный на спутниках серии NOAA и прибор SEVIRI, установленный на геостационарном спутнике METEOSAT-10.

Прибор SEVIRI на геостационарном спутнике METEOSAT-8,9,10,11 измеряет уходящее излучение в 12 спектральных каналах в видимой и ИК областях спектра. Эти измерения позволяют изучать характеристики облачности, океанов и суши, содержание водяного пара в тропосфере, поля ветра в тропосфере, дают информацию об общем содержании озона, температуре поверхности. При этом эта информация может быть получена с высоким временным разрешением (каждые 15 минут) на огромных территориях (60 градусов от подспутниковой точки с пространственным разрешением 1–3 км в надире).

Прибор SEVIRI служит для получения изображений в видимой и инфракрасной области спектра; анализа поля облаков и аэрозолей; определения температуры поверхности океана и морей, параметров земной поверхности, пожаров, снежного покрова и верта. В таблице 1 приведена радиометрическая точность измерений по используемым в работе каналам прибора SEVIRI.

Таблица 1: Используемые спектральные каналы прибора SEVIRI

Номер канала	Центральная длина волны, мкм	Радиометрическая точность
1	0.6	10.1 (при 1 % альбедо)
2	0.8	7.28 (при 1 % альбедо)
3	1.6	3 (при 1 % альбедо)
4	3.9	0.35 К (при 300 К)
9	10.8	0.25 К (при 300 К)
10	12.0	0.37 К (при 300 К)

Существующие технические средства спутникового зондирования атмосферы позволяют регистрировать как отраженную солнечную радиацию, несущую информацию о свойствах подстилающей поверхности и облаков в светлое время суток, так и собственное тепловое излучение в течении всех суток.



Для целей диагностики фазового состояния облаков наиболее ценной представляется информация в видимом и ближнем инфракрасном участках спектра, где зависимость оптических свойств облаков от высоты Солнца позволяет определить их характеристики. Различия в коэффициенте поглощения электромагнитных волн капель воды и кристаллов льда в ближней инфракрасной области спектра позволяют оценивать ледянную фракцию облачных частиц. Необходимую информацию можно получить из каналов на длинах волн 0.6, 0.8 и 1.6 мкм (приборы SEVIRI и AVHRR).

В третьей главе описан метод решения прямой задачи дистанционного зондирования облачной атмосферы. В разделе 3.1 рассмотрено взаимодействие электромагнитных волн с облачными частицами. С помощью математического аппарата теории дифракции Ми программно реализована модель рассеяния электромагнитных волн на облачных частицах с использованием языка программирования Python для решения системы уравнений Максвелла с граничными условиями на поверхности сферической частицы произвольного радиуса.

Описывается алгоритм определения коэффициентов поля рассеяния Ми  $a_n$  и  $b_n$  с применением обратной рекурсии, угловых функций  $\pi_n$  и  $\tau_n$  с применением прямой рекурсии. С помощью этих параметров можно выразить все характеристики поглощения и рассеяния электромагнитного излучения сфероидальными частицами любых размеров и с любым показателем преломления. Для моделирования радиационных свойств облаков важно знать следующие параметры: сечения рассеяния, поглощения и ослабления, а также их факторы эффективности, которые определяются следующими формулами:

$$K_{\text{рас}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left( |a_n|^2 + |b_n|^2 \right), \quad (1)$$

$$K_{\text{осл}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \Re(a_n + b_n), \quad (2)$$

$$K_{\text{погл}} = K_{\text{осл}} - K_{\text{рас}}, \quad (3)$$

$$\sigma_i = \pi r^2 K_i, \quad (4)$$

где  $K_{\text{рас}}$  – коэффициент рассеяния;  $K_{\text{погл}}$  – коэффициент поглощения;  $K_{\text{осл}}$  – коэффициент ослабления;  $\sigma_i$  – соответственно площади сечения рассеяния, поглощения и ослабления.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты численного моделирования оптических свойств отдельных облачных частиц.

В разделе 3.1.3 проведен метод учета фрактальных свойств кристаллов льда, осуществляющийся введением понятия эффективной диэлектрической

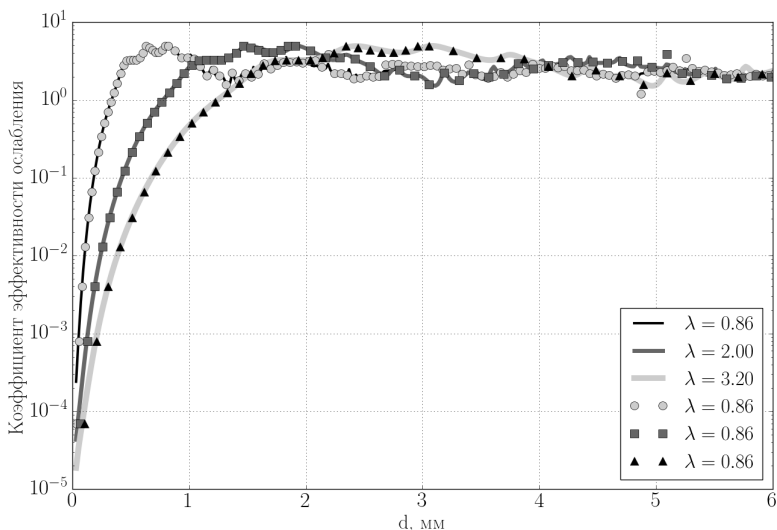


Рис. 2: Зависимость площади поперечного сечения ослабления от диаметра капли воды при температуре  $10^{\circ}\text{C}$  для разных длин волн:  $\lambda_1 = 0.86$  см (а, а'),  $\lambda_2 = 2.0$  см (б, б') и  $\lambda_3 = 3.2$  см (в, в'). Сплошные линии – модельные расчеты, точки – по экспериментальным данным

проницаемости  $\varepsilon'_D$ , зависящей от фрактальной размерности кристаллов льда  $D$  и определяющей по формуле:

$$\varepsilon'_D = \frac{1 - P + 0.58P\varepsilon'}{1 - P + 0.58P}, \quad (5)$$

где  $P = 6Al^{D-3}(\pi\rho_l)^{-1}$ . Значение  $P$  зависит от плотности льда  $\rho_l$ , фрактальной размерности кристаллов льда  $D$  и коэффициента  $A$ , который в свою очередь зависит от типа кристаллов льда. В таблице 2 приведены фрактальные характеристики кристаллов льда.

Таблица 2: Фрактальные характеристики кристаллов льда

Тип кристалла	A	D
иглы	0.1	2.54
пластинки	0.8	2.54
звездочки	0.3	2.75
крупа	56.5	2.95

Необходимо отметить, что применение модели рассеяния электромагнитных волн на кристаллах льда с учетом их фрактальных

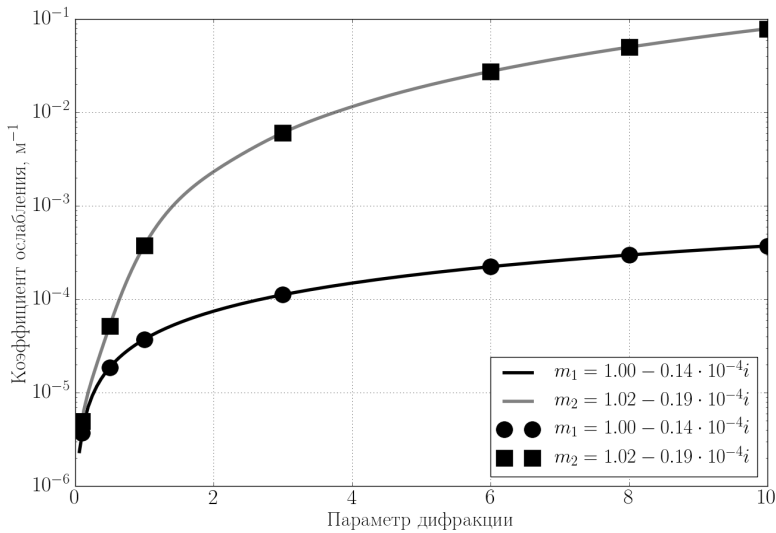


Рис. 3: Зависимость фактора эффективности ослабления от параметра дифракции для снежинок с разными показателями:  $m_1 = 1.00 - 0.14 \cdot 10^{-4}i$  (а, а') и  $m_2 = 1.02 - 0.19 \cdot 10^{-4}i$  (б, б')

свойств позволяет улучшить качество оценки параметров кристаллических и смешанных облаков дистанционными методами зондирования атмосферы.

В разделе 3.2 рассмотрены две атмосферные модели: асимптотическая модель и оптическая модель Эддингтона.

В рассеивающем слое большой оптической толщины оказывается возможным аналитическое решение уравнение переноса, выражающееся асимптотическими формулами теории переноса излучения, причем доказано существование и единственность этого решения.

Метод Эддингтона является разновидностью двухпоточковых аппроксимаций. Двухпоточковые аппроксимации в теории переноса излучения основаны на различных аналитических формулах, приближенно описывающих угловое распределение поля восходящей и нисходящей интенсивности на границах плоскопараллельной среды.

В разделе 3.3 проведен сравнительный анализ двух моделей атмосферы путем осуществления расчетов оптических свойств облачной атмосферы. Для этого необходимы следующие параметры: альbedo подстилающей поверхности  $A_s$ ; зенитный угол Солнца  $\theta$ ; параметр индикатрисы  $g$ ; альbedo однократного рассеяния  $\omega$ ; оптическая толщина облачной атмосферы  $\tau$ . В таблице 3 представлены некоторые характеристики оптических моделей для трех каналов прибора SEVIRI.

Таблица 3: Основные характеристики оптических моделей для видимых каналов прибора SEVIRI

Параметры	Длина волны, мкм		
	0.6	0.8	1.6
$\tau_m$	0.067	0.022	0.002
$\omega_a$	0.95	0.96	0.97
$\omega_w$	0.999999	0.999999	0.999999
$\omega_i$	0.999999	0.999999	0.993
$g_m$	0.30	0.30	0.30
$g_a$	0.72	0.73	0.74
$g_w$	0.85	0.86	0.87
$g_i$	0.88	0.89	0.90

На рисунке 4 показано сравнение работоспособности оптических моделей атмосферы при различных значениях альbedo однократного рассеяния. Проведенное сравнение на основе данных рисунка 4 оптических

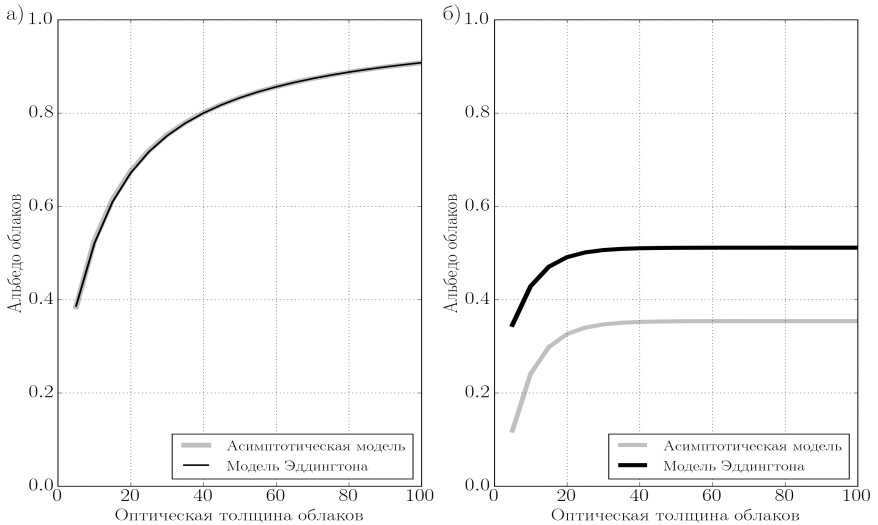


Рис. 4: Зависимость альbedo облаков от их оптической толщины при  $\omega = 0.999999$  (а) и при  $\omega = 0.99$  (б) по двум моделям

моделей облачной атмосферы на основе асимптотических формул теории переноса радиации и приближения Эддингтона показало, что в случае слабого поглощения радиации в облаке аэрозолями и кристаллами льда (при альbedo однократного рассеяния более 0.999), обе модели дают сопоставимые результаты. Однако, на длине волны 1.6 мкм (3 канал SEVIRI) значительно

поглощение кристаллами льда и альbedo однократного рассеяния может уменьшаться до 0.993, где модель Эддингтона дает лучшую зависимость альbedo облаков от их оптической толщины. На основании этого была выбрана оптическая модель Эддингтона для моделирования оптических свойств как капельных, так и смешанных облаков.

В **четвертой главе** приведен алгоритм решения обратной задачи дистанционного зондирования облачной атмосферы и представлены результаты диагностики фазового состояния тропосферных облаков по спутниковым данным.

В разделе 4.1 представлена блок-схема разработанного программного средства для получения первичных спутниковых данных и также описан метод определения облачных пикселей на спутниковом изображении. Предварительным этапом в алгоритме определения параметров облаков по спутниковым данным является выделение пикселей изображения, занятых облаками. Для этих целей были выделены шесть критериев, позволяющих распознавать облака на фоне различных типов подстилающей поверхности:

- 1) альbedo поверхности на длине волны 0.6 мкм (A006);
- 2) отношение альbedo на длине волны 0.8 мкм к альbedo на длине волны 0.6 мкм (R0806);
- 3) альbedo поверхности на длине волны 1.6 мкм (A016);
- 4) разность яркостных температур на длинах волн 3.9 и 10.8 мкм с учетом зенитного угла Солнца (D0410);
- 5) яркостная температура на длине волны 10.8 мкм (T108);
- 6) разность яркостных температур на длинах волн 10.8 и 12.0 мкм (D1012).

В результате гистограммного анализа для каждого из шести правил был установлен весовой коэффициент, пропорциональный частоте повторения событий распознавания по данному критерию (см. табл. 4).

Таблица 4: Параметры решающих правил распознавания облаков

Правило	Диапазон значений	Повторяемость, %	Весовой коэффициент
A006	0.4 ... 0.6	9.3	0.310
A016	0.25 ... 0.55	16.7	0.380
R0806	1.02 ... 1.10	13.8	0.123
D0410	2 ... 7	10.9	0.129
T108	<287	32.7	0.049
D1012	-0.5 ... 0.7	16.6	0.090

Пиксель изображения является облачным при превышении суммы весовых коэффициентов более 0.17. Пример распознавания облачных пикселей представлен на рис. 5.

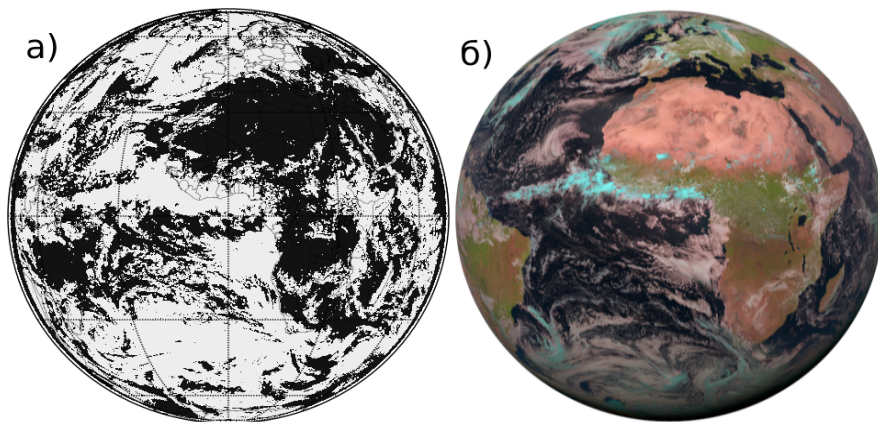


Рис. 5: Пример распознавания облачных пикселей: облачная маска (а) и композитное RGB-изображение по данным 1, 2, 3 каналов прибора SEVIRI (б)

В разделе 4.2 описан порядок определения фазового состояния облаков по спутниковым данным. Для этого сначала необходимо из спутниковых данных, для облачных пикселей, на основе решения обратной задачи модели Эддингтона определить оптическую толщину облаков (жидко-капельных и кристаллических), затем определить водо- и льдозапас облаков, на основании которого можно определить фазовое состояние облаков, как интегральную долю кристаллов льда в облаке.

Для определения оптической толщины облаков по модели Эддингтона нужно осуществить многократный расчет альbedo облаков ( $A_c$ ) при изменяющихся в определенном диапазоне с заданным шагом ( $0.1^\circ$ ) значений зенитного угла Солнца и оптической толщины облаков (с шагом 0.01). В результате были получены вспомогательные таблицы зависимости оптической толщины облаков ( $\tau_1$ ,  $\tau_3$ ) от зенитного угла Солнца и альbedo облаков для первого и третьего каналов прибора SEVIRI.

Алгоритм обработки спутниковых данных SEVIRI с целью определения оптической толщины облачной атмосферы основан на зависимости данного параметра от регистрируемого альbedo системы облако-подстилающая поверхность ( $A_c$ ) и зенитного угла Солнца ( $z$ ):  $\tau = f(A_c, z)$ . По результатам обработки данных описанным выше способом получаются значения оптической толщины атмосферы для первого ( $\tau_1$ ) и третьего каналов прибора SEVIRI. Примеры таких данных представлены в таблицах 5 и 6 при  $g = 0.85, 0.88$  и  $\omega = 0.999999, 0.999$  соответственно.

Альbedo однократного рассеяния выступает в качестве характеристики ослабления радиации за счет поглощения и для облачной атмосферы

Таблица 5: Оптическая толщина облаков при различных значениях зенитного угла Солнца и альбедо облаков на длине волны 0.6 мкм

Зенитный угол Солнца, град.	Альбедо облаков					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	1.00	4.12	9.38	18.84	46.56	—
5	1.00	4.09	9.31	18.84	46.56	—
10	1.00	4.01	9.18	18.58	46.24	—
15	1.00	3.90	8.99	18.32	45.60	—
20	1.00	3.74	8.75	17.82	44.67	—
25	1.00	3.54	8.39	17.34	43.45	—
30	1.00	3.30	7.94	16.63	42.27	—
35	1.00	3.04	7.46	15.85	40.55	—
40	1.00	2.74	6.92	15.00	38.90	—
45	1.00	2.44	6.32	14.00	36.81	—
50	1.00	2.11	5.70	12.97	34.83	—
55	1.00	1.77	5.00	11.78	32.51	—
60	1.00	1.45	4.24	10.54	29.92	—
65	1.00	1.15	3.49	9.25	27.35	—
70	—	—	—	—	—	—

определяется из формулы:

$$\tau(1 - \omega) = \tau_m(1 - \omega_m) + \tau_a(1 - \omega_a) + \tau_w(1 - \omega_w) + \tau_i(1 - \omega_i), \quad (6)$$

где  $\tau_m$ ,  $\tau_a$ ,  $\tau_w$ ,  $\tau_i$  - молекулярная, аэрозольная, капельная и кристаллическая оптическая толщина атмосферы;  $\omega_m$ ,  $\omega_a$ ,  $\omega_w$ ,  $\omega_i$  - молекулярное, аэрозольное, капельное и кристаллическое альбедо однократного рассеяния.

Поскольку для длины волны 0.6 мкм (1 канал SEVIRI) поглощение радиации каплями воды и кристаллами льда очень мало, то при условии, что оптическая толщина облаков намного больше оптических толщин молекулярного и аэрозольного рассеяния можно определить *оптическую толщину облаков* как:

$$\tau_c = \tau_1. \quad (7)$$

На длине волны 1.6 мкм (3 канал SEVIRI) кристаллы льда уже существенно поглощают электромагнитное излучение и необходимо учитывать вклад кристаллов льда в общую оптическую толщину атмосферы. В этом случае оптическая толщина кристаллов льда определяется, при условии, что аэрозольная оптическая толщина намного меньше оптической толщины атмосферы, по выражению:

$$\tau_i = \tau_3 \frac{1 - \omega_3}{1 - \omega_{3i}}. \quad (8)$$

Таблица 6: Оптическая толщина облаков при различных значениях зенитного угла Солнца и альbedo облаков на длине волны 1.6 мкм

Зенитный угол Солнца, град.	Альbedo облаков					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	1.00	5.21	12.11	26.24	—	—
5	1.00	5.21	12.02	26.24	—	—
10	1.00	5.11	11.86	25.88	—	—
15	1.00	4.97	11.61	25.35	—	—
20	1.00	4.76	11.30	24.66	—	—
25	1.00	4.51	10.84	23.82	—	—
30	1.00	4.18	10.26	22.86	—	—
35	1.00	3.85	9.64	21.63	—	—
40	1.00	3.47	8.87	20.32	—	—
45	1.00	3.06	8.11	18.84	101.62	—
50	1.00	2.65	7.26	17.34	78.70	—
55	1.00	2.23	6.37	15.74	64.86	—
60	1.00	1.82	5.40	14.00	54.95	—
65	1.00	1.43	4.42	12.19	46.88	—
70	1.00	1.07	3.44	10.40	39.99	—

Отсюда получаем выражения для определения *оптической толщины жидко-капельной фракции*:

$$\tau_w = \tau_c - \tau_i. \quad (9)$$

В разделе 4.2.2 описан метод определения водо- и льдо запаса облаков на основе данных об их оптической толщине. С использованием результатов определения коэффициента ослабления по теории Ми, гамма-функции распределения облачных частиц по размерам и привлечением экспериментальных данных нами получена параметризация оптической толщины капельно-жидких облаков как функции их водозапаса по формуле:

$$\tau_w = \frac{LWP}{2.7 \cdot 10^{-3} + 3.5 \cdot 10^{-3} LWP^{0.53}}. \quad (10)$$

Зная оптическую толщину капельно-жидких облаков можно определить их водозапас, решив обратную задачу по формуле (10) и определить водозапас как функцию оптической толщины:

$$LWP = f(\tau_w). \quad (11)$$

Для определения льдозапаса облаков используется формула:

$$IWP = \frac{\tau_i^{1.19}}{65}. \quad (12)$$



На рисунках 6 и 7 представлено пространственное распределение значений водозапаса и льдозапаса облаков по данным прибора SEVIRI в области широт от  $-5^\circ$  до  $25^\circ$  и долгот от  $-50^\circ$  до  $20^\circ$ .

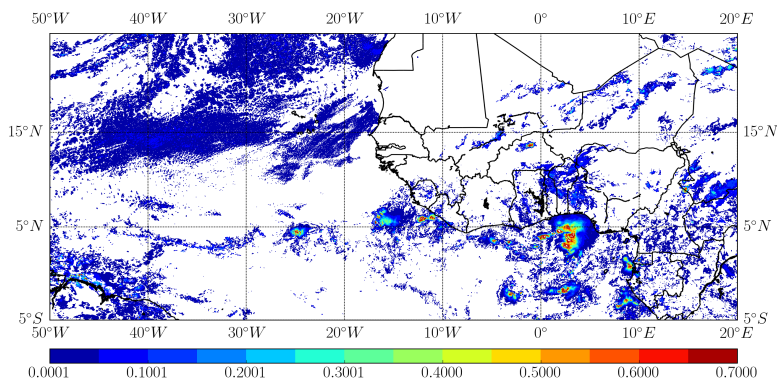


Рис. 6: Пространственное распределение значений водозапаса облаков по спутниковым данным 01.05.2014 11:15 UTC

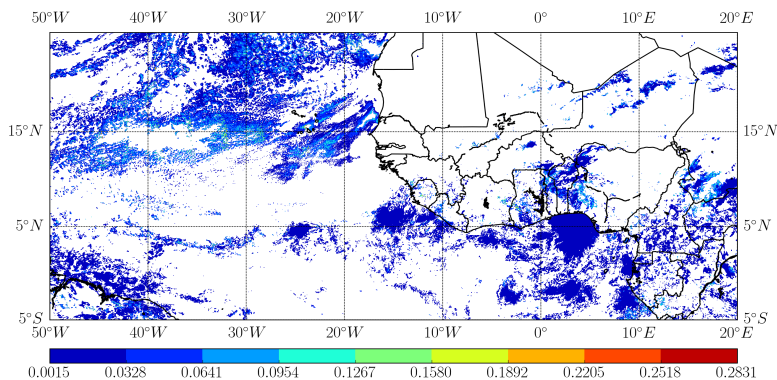


Рис. 7: Пространственное распределение значений льдозапаса облаков по спутниковым данным 01.05.2014 11:15 UTC

Фазовое состояние облаков представляет интегральную долю кристаллов льда  $F$  в облаке и определяется по формуле:

$$F = \frac{IWP}{IWP + LWP}, \quad (13)$$

где  $F$  – интегральная доля кристаллов льда в облаке;  $IWP$  – льдозапас облаков;  $LWP$  – водозапас облаков.

Также для выбранного района исследования построена карта распределения значений фазового состояния облаков (рис. 8) и рассчитана повторяемость его значений (рис. 9).

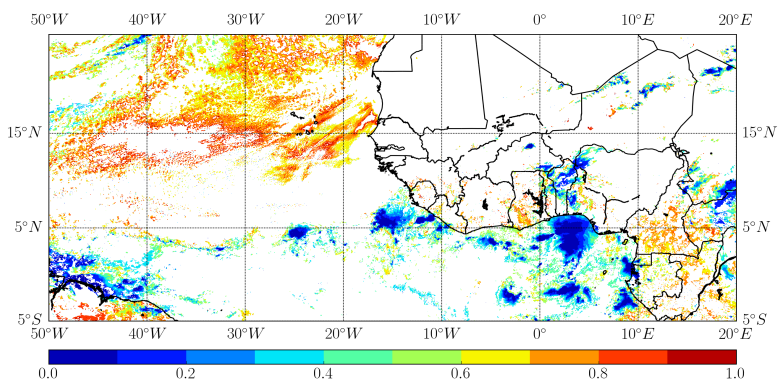


Рис. 8: Пространственное распределение значений фазового состояния облаков по спутниковым данным 01.05.2014 11:15 UTC

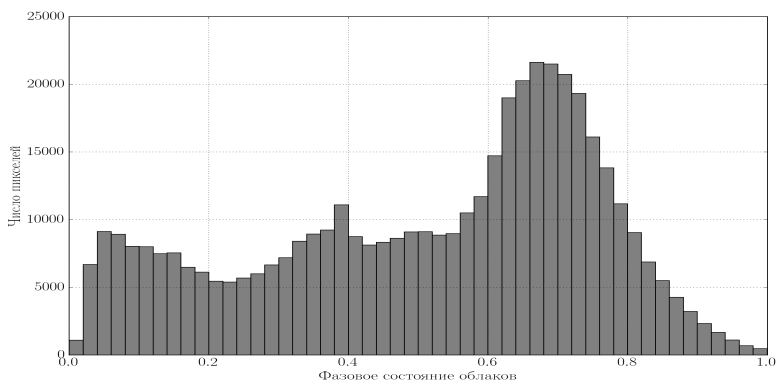


Рис. 9: Повторяемость значений фазового состояния облаков по спутниковым данным 01.05.2014 11:15 UTC

В таблице 7 представлены по выбранному региону диапазоны значений водо-, льдозапаса фазового состояния облаков в различное время. Расчитанные по предложенной методике значения водозапаса равны  $0.042 \pm 0.063 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$  в мае и  $0.046 \pm 0.066 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$  в ноябре. Эти результаты сравнимы с данными ISCCP, которые составляют  $0.033 \pm 0.009 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$  и  $0.065 \pm 0.025 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$ , соответственно.

В разделе 4.3 проведено сопоставление данных измерений водозапаса облаков спутниковым прибором и микроволновым радиометром. Для

Таблица 7: Результаты определения водо-, льдозапаса и фазового состояния облаков для района широт от  $-5^{\circ}$  до  $25^{\circ}$  и долгот от  $-50^{\circ}$  до  $20^{\circ}$

Время UTC	LWP, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$	IWP, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$	F
01.05.2014 11:15	$0.035 \pm 0.055$	$0.023 \pm 0.022$	$0.51 \pm 0.24$
02.05.2014 11:00	$0.038 \pm 0.057$	$0.022 \pm 0.023$	$0.48 \pm 0.24$
03.05.2014 11:00	$0.048 \pm 0.071$	$0.020 \pm 0.021$	$0.44 \pm 0.24$
05.05.2014 11:00	$0.047 \pm 0.070$	$0.018 \pm 0.019$	$0.42 \pm 0.23$
14.11.2014 11:45	$0.042 \pm 0.058$	$0.020 \pm 0.023$	$0.42 \pm 0.23$
15.11.2014 11:45	$0.051 \pm 0.069$	$0.017 \pm 0.020$	$0.36 \pm 0.22$
16.11.2014 11:45	$0.036 \pm 0.057$	$0.019 \pm 0.022$	$0.45 \pm 0.21$
17.11.2014 11:45	$0.054 \pm 0.080$	$0.019 \pm 0.021$	$0.41 \pm 0.25$

проверки работоспособности разработанных алгоритмов осуществлено сопоставление восстановленных данных о водозапасе облаков по спутниковым данным прибора SEVIRI с подспутниковыми измерениями микроволновым радиометром. Для этого был выбран период синхронных измерений, проведенных на Центральной экспериментальной полевой базе ФГБУ «ГГО» в п. Воейково, и с помощью спутника METEOSAT-10. Значения водозапаса облаков в этот период практически соответствуют среднегодовым значениям, что видно из рисунка 10, построенного по данным проекта ISCCP.

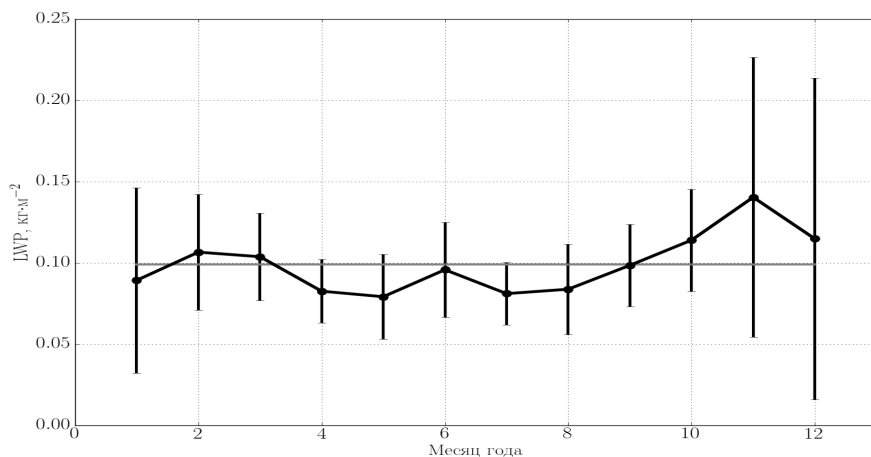


Рис. 10: Годовой ход водозапаса облаков в районе Санкт-Петербурга по данным ISCCP (осреднение за период с 1983 по 2009 гг.)

На рисунке 11 представлена диаграмма рассеяния значений водозапаса облаков, показывающая наличие невысокой корреляции

между сопоставляемыми временными рядами. Это может быть объяснено неоднородностью распределения влажности в облаках и зондированием различных частей облаков в каждом из используемых методов: микроволновый метод использует измерения уходящей радиации с нижней границы облаков, а спутниковый метод - с верхней границы облаков.

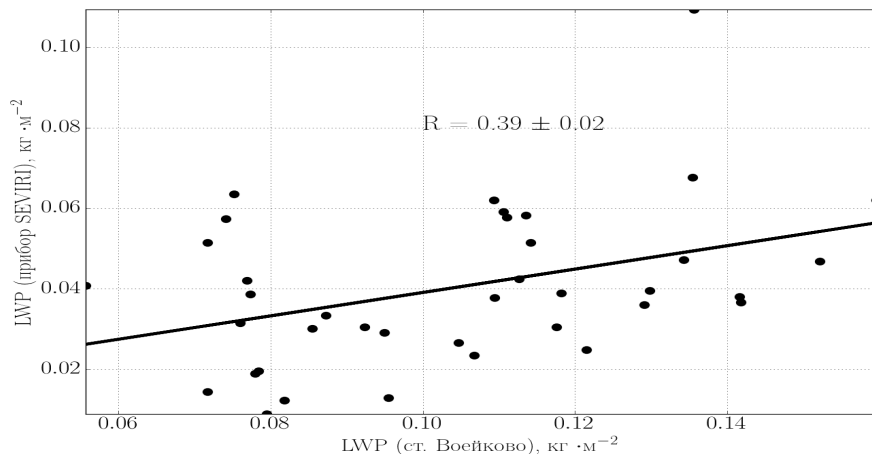


Рис. 11: Диаграмма рассеяния значений водозапаса облаков в районе п. Воейково: по данным наземных измерений и по спутниковым данным

Проведена верификация также решения прямой задачи. Для этого на основе данных наземных измерений водозапаса облаков с помощью параметризации (10) определялась оптическая толщина капельно-жидких облаков. По этим данным для светлого времени суток (когда высота Солнца больше 10 градусов) с помощью модели Эддингтона определялось альbedo облаков при двух значениях альbedo подстилающей поверхности (0.0 и 1.0). Эти данные вместе с данными измерений альbedo прибором SEVIRI представлены на рисунке 12. Видно подобие на качественном уровне между сопоставляемыми параметрами.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

- 1) создана численная модель рассеяния электромагнитных волн облачными каплями воды и кристаллами льда, которая учитывает как размеры облачных частиц, так и зависимость диэлектрических свойств воды и льда от длины волны ЭМВ и температуры воздуха;
- 2) программно реализована модель облачной атмосферы для осуществления решения прямой задачи дистанционного зондирования облаков на основе метода дельта-Эддингтона для радиационных потоков в атмосфере;

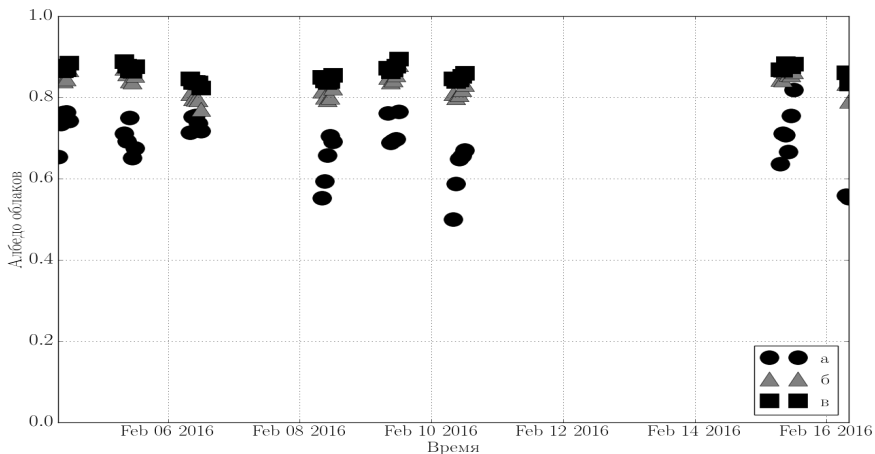


Рис. 12: Временной ход значений альbedo облаков по данным прибора SEVIRI (а) и по данным микроволнового радиометра при альbedo поверхности, равном 0.0 (б) и 1.0 (в)

- 3) разработан и программно реализован многокритериальный алгоритм определения «облачных» пикселей на основе многоспектральных спутниковых изображений, который показал сравнительно высокую оправдываемость, составившую 77%;
- 4) разработан алгоритм решения обратной задачи дистанционного зондирования атмосферы с целью определения оптической толщины облаков над однородной поверхностью с известной отражательной способностью поверхности;
- 5) проведены оценки фазового состояния смешанных облаков на основе водо- и льдозапаса облаков, полученных по спутниковым данным прибора SEVIRI;
- 6) осуществлена верификация полученного метода определения водозапаса облаков с привлечением экспериментальных данных микроволнового радиометра, показавшая подобие временного хода рассматриваемого параметра облаков, определенного двумя различными методами.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Нгуен Т.Т., Чукин В.В. Модель рассеяния электромагнитных волн на каплях воды и фрактальных кристаллах льда // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 38. С. 93–101.
2. Диагностика ледяных ядер в облаках по данным прибора SEVIRI / В.В. Чукин, И.Н. Мельникова, Т.Т. Нгуен [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 4. С. 133–142.
3. Чукин В.В., Нгуен Т.Т. Численная фрактальная модель диэлектрических свойств кристаллов льда // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N2012610105. 2012.
4. Нгуен Т.Т., Чукин В.В. Программа для определения аэрозольной оптической толщины по данным прибора SEVIRI // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N2015613535. 2015.
5. Чукин В.В., Нгуен Т.Т. Определение фазового состояния облаков по данным прибора SEVIRI в видимом и ближнем ИК диапазоне длин волн [Электронный ресурс] // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 2(56). DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.002. URL: <http://research-journal.org/earth/opredelenie-fazovogo-sostoyaniya-oblakov-po-dannym-pribora-seviri-v-vidimom-i-blizhnem-ik-diapazone-dlin-voln/>.
6. Чукин В.В., Нгуен Т.Т. Рассеяние электромагнитных волн на сферических кристаллах льда // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 10. С. 58.
7. Нгуен Т.Т., Чукин В.В. Модель рассеяния электромагнитных волн на фрактальных частицах // Физика окружающей среды: Материалы конференции. Томск: Томское университетское издательство, 2011. С. 251–254.
8. Нгуен Т.Т. Исследование деполяризационных свойств кристаллических облаков // XV Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков. Тезисы докладов. СПб.: Изд-во Соло, 2011. С. 87–89.
9. Нгуен Т.Т., Чукин В.В. Моделирование радиационных свойств облаков // Труды 16 Международной школы-конференции молодых ученых "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы". 2012. С. 149–150.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями просим направить по адресу: **192007, РФ, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.01, Ученому секретарю.**

В отзыве необходимо указать полностью ФИО, ученую степень, ученое звание, должность и место работы, полное наименование учреждения и почтовый адрес, телефон, электронную почту.