

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. А.М. ОБУХОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



УДК 551.576.2: 551.576.32-36

Кудабаева Дина Айтжановна

**Экспериментальное исследование структуры мезосферной облачности
Северного полушария**

Специальность 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: доктор
физико-математических
наук Перцев Н.Н.

Москва – 2017

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор методов и результатов изучения пространственно-временных свойств мезосферной облачности.....	11
1.1. Методы и важнейшие достижения изучения серебристых облаков.....	11
1.2. Высоты и движение С.О. по данным визуальных наблюдений с применением метода триангуляции, а также с помощью теодолитных измерений и фотосъемок.	11
1.3. Лидарные измерения структуры С.О.	14
1.4. Исследование серебристых облаков с использованием орбитальных аппаратов.....	15
1.5. Статистическое обобщение свойств полей С.О., определяемых по наземным и космическим наблюдениям.....	18
Глава 2. Вариации площади глобального поля серебристых облаков Северного полушария в сезоны 2007–2012 гг.....	24
2.1. Характеристики инструмента CIPS AIM.....	24
2.2. Технология формирования полос изображений С.О. на основе данных CIPS.....	26
2.3. Изображения, получаемые прибором CIPS, и их характеристики	27
2.4. Вычисление площади полей С.О. и их изменений во времени.....	32
2.5. Аппроксимация изменений площади поля С.О. и интерпретация результатов исследования.....	42
Глава 3. Стационарные долготные неоднородности в площадях мезосферных облаков по данным CIPS AIM (июнь – июль).....	53
3.1. Анализ вариаций площади облачного поля по долготным секторам в интервале широт 50 – 80° N.....	56
3.2. Долготные вариации площади полей С.О. в более узких широтных диапазонах.....	60

Глава 4. Возможность формирования серебристых облаков тропосферными метеорологическими объектами при посредничестве атмосферных волн	74
4.1. Изучение связи между тропосферными метеорологическими объектами и серебристыми облаками. Состояние вопроса.	74
4.2. Детальная проработка гравитационно-волнового механизма связи между тропосферными структурами и серебристыми облаками для наблюдения 18/19 июля 2013 г.	79
Заключение	92
Список литературы	94

Введение

В диссертации рассматриваются свойства облаков в летней верхней мезосфере, - которые с той или иной вероятностью, зависящей от широты, возникают несколько ниже наиболее холодного места в атмосфере Земли - летней мезопаузы, располагающейся на высоте около 85 км. Условия возникновения мезосферной облачности в значительной степени отличаются от тех, что имеют место в тропосфере. В летний период на субполярных широтах температурный минимум мезопаузы может иметь значения вплоть до $-125 - -135^{\circ}\text{C}$ и ниже. Именно при таких значениях температуры в области мезопаузы (Rapp, Lübken, Mullemann et al., 2002) формируются мезосферные, широко известные как «серебристые» облака (далее С.О.). В отличие от тропосферных облаков, которые могут содержать и жидкие, и твердые частицы воды, С.О. состоят из исключительно ледяных частиц с характерным размером от 10 до 100 нм.

Актуальность. Изучение закономерностей появления и свойств серебристых облаков имеет важное значение для понимания устойчивости и трендов климата средней атмосферы и земной климатической системы в целом. Неожиданное появление С.О. как нового явления природы в 1885 г. до сих пор нельзя считать полностью объясненным в рамках существующих моделей состава и теплового режима атмосферы (см., напр., (Dalín et al., 2012)). Поэтому мониторинг и климатологическое описание свойств серебристых облаков остаются актуальной задачей, решению которой международное сообщество посвящает многочисленные спутниковые, наземные и аналитические проекты. Кроме того, С.О. важны для исследователей как индикатор волновых движений в мезосфере на масштабах от сотен метров до планетарного.

Цели работы

1. На основе данных космического мониторинга мезосферных облаков за

период 2007-2012 гг. изучить основные статистические закономерности вариаций размеров площади мезосферно-облачной полярной шапки Северного полушария (среднегодовой сезонный ход, межгодовые вариации, долготные вариации).

2. В рамках исследования влияния динамических процессов, происходящих в нижних слоях атмосферы, на характеристики мезосферных облаков выявить и продемонстрировать, с использованием базы реальных атмосферных данных и с привлечением современной модели распространения атмосферных гравитационных волн, возможности и особенности образования наблюдаемых вариаций локальных структур С.О. за счет воздействия гравитационных волн, возникающих в результате развития метеорологических возмущений в на высотах тропосферы.

Научная новизна. Впервые в мировой геофизике на основе спутниковых данных создана методика вычислений вариаций размеров площади, занятой мезосферной облачностью, на планетарном масштабе, а также построены временные ряды этой величины с суточным шагом для 6 летних сезонов и проведено исследование пространственно-временных свойств соответствующих полей С.О. Элемент новизны вносит и детальная проработка механизма тропосферно-мезосферных связей за счет генерации гравитационных волн в тропосфере и последующего проникновения их в мезосферу, сделанная на основе данных стереофотосъемки с привлечением данных спутниковых измерений и реанализа.

Практическая значимость. Полученные в диссертации временные ряды вариаций размеров площади мезосферной облачности могут быть использованы для сопоставления с данными о вариациях температуры, влажности и ветра в верхней мезопаузе. Построенная эмпирическая аппроксимация сезонного хода изменений глобальной площади мезосферной облачности может применяться в разнообразных геофизических исследованиях и планировании космических

экспериментов. Результаты диссертационной работы также дают важный стимулирующий импульс для дальнейшего изучения обнаруженных в диссертации высокоширотных стационарных планетарных волн весьма заметной амплитуды, а также для изучения тропо-мезосферных связей, обусловленных воздействием гравитационных волн.

Личный вклад автора. Основные результаты исследования, составляющих содержание диссертации, получены автором, либо в соавторстве при его непосредственном участии. Личный вклад автора диссертации можно оценить как заметный на всех этапах работы. Им создана информационная база данных, содержащей сведения о параметрах глобального поля С.О. Северного полушария. Автором разработана алгоритмизация процесса обработки космических изображений полей С.О. и создана программа проведения расчётов по определению площади облачного поля для протяжённого периода получения изображений. Автор выполнил большой объём работы по статистической обработке и графического представления, и интерпретации полученных результатов.

Апробация работы.

По основным результатам, представленных в диссертации, опубликовано 10 работ, в том числе 3 в перечне журналов ВАК:

1. Солодовник А., Кудабаяева Д. Исследование природы серебристых (мезосферных) облаков в связи с проблемой изменения климата Земли. // Материалы четвертой международной студенческой научной конференции «Анализ и моделирование социально-экономических процессов и систем», Омск, 2009 г. – С. 50-51

2. Солодовник А., Кудабаяева Д. и др. Метеорологические процессы в тропосфере Земли и происхождение серебристых облаков // ВЕСТНИК Актюбинского государственного педагогического института, №1, 2010, – С.109-114.

3. Солодовник А., Кудабаева Д. и др. Серебристые облака: проблемы образования и вопрос о дефинициях // Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан. Серия физ.-мат. №4, 2011, – С.105-110.

4. Солодовник А., Кудабаева Д. Метеорология тропосферы и появления серебристых облаков в сезоны 2010-2011 года. // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы небесных тел и плазменного состояния вещества. Эксперимент и математическое моделирование», Петропавловск, СКГУ, 2011, – С. 44-47.

5. Солодовник А., Кудабаева Д. и др. К поиску связи процессов формирования серебристых облаков и погодно-климатических явлений. // Международная научно-практическая конференция XIX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири» РАН, Сибирское отделение, институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева, Российский фонд фундаментальных исследований. Томск, 2012 – 69 с.

6. Солодовник А.А., Кудабаева Д.А. Опыт и перспектива изучения серебристых облаков. Часть 1. Проблема образования и дефиниции // Материалы международного научно-практического симпозиума «Таможенный союз: наука и образование без границ», Петропавловск, 2012, – С. 246-252.

7. Кудабаева Д., Солодовник А. и др. Сезонные и межсезонные вариации площади глобального поля серебристых облаков // Известия НАН РК. Серия: физико-математическая. 2013, №3, – С. 102-107.

8. P. Dalin, A. Pogoreltsev , N. Pertsev , V. Perminov , N. Shevchuk , A. Dubietis , M. Zalcik , S. Kulikov , A. Zadorozhny , D. Kudabayeva et al. Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a tropospheric occluded front // Geophysical Research Letters/ DOI 10.1002/2014GL062776 – 2015 г.

9. Кудабаева Д. Стационарные долготные неоднородности в площадях мезосферных облаков по данным CIPS/AIM (июнь–июль) // Геомагнетизм и

аэрономия, 2015, том 55, № 6, – С. 1-4.

10. Кудабаяева Д., Солодовник А. Вариации площади глобального поля серебристых облаков Северного полушария в сезоны 2007-2012 гг. // Геомагнетизм и аэрономия, 2015 том 55, № 2, -С. 274-278.

Основные результаты и выводы, на основании которых подготовлена диссертация, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Международная научная конференция «Космос на благо человечества – взгляд в будущее» (Астана, 2011);

Международная научная конференция «Независимый Казахстан: 20 лет развития космических исследований» (Алматы, 2011);

Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы небесных тел и плазменного состояния вещества. Эксперимент и математическое моделирование» (Петропавловск, 2011);

Международный научно-практический симпозиум «Таможенный союз: наука и образование без границ» (Петропавловск, 2012);

XIII Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» (Москва, 2015).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе ежесуточных спутниковых (AIM) карт мезосферной облачности в течение шести летних сезонов (2007-2012 гг.) рассчитаны площади мезосферной облачности Северного полушария в диапазоне широт 50-80° N. Для них построены соответствующие пространственно-временные массивы данных с шагом 1 сутки по времени, 10° по широте, 45° по долготы.

2. С помощью подготовленных пространственно-временных массивов данных получены климатологические характеристики площади мезосферной облачности: среднемноголетний сезонный ход, межгодовые вариации сезонного хода, устойчивые долготные различия.

3. С помощью анализа метеорологической обстановки в нижних широтах Северного полушария для одного случая наблюдений серебристых облаков и детального моделирования распространения атмосферных гравитационных волн показано, что при благоприятных условиях динамические процессы, обусловленные метеорологическими образованиями в нижней атмосфере, могут являться источником возникновения наблюдаемых структур в серебристых облаках.

Структура и объем диссертации. Настоящая диссертация, насчитывающая 103 страницы, 33 иллюстрации, 9 таблиц, содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы.

В первой главе представлен обзор литературы по тематике диссертации. Дано описание различных наземных и космических методов исследования С.О., представлены результаты теоретических и экспериментальных работ изучения мезосферной облачности.

Во второй главе дано описание многолетне-осредненного сезонного изменения площади глобального поля мезосферных серебристых облаков по времени на основе данных спутника AIM, а также особенностей изменения площади облачного поля для отдельных сезонов.

В третьей главе представлены результаты исследования долготной неоднородности площадей глобального поля серебристых облаков Северного полушария по данным, полученным аппаратом CIPS со спутника AIM в период с 2007 по 2012 гг.

В четвертой главе анализируется состояние вопроса о влиянии тропосферных метеорологических процессов на возникновение серебристых облаков и наблюдаемых в них структур, а также детально рассмотрен случай наблюдения внутренних гравитационных волн в серебристых облаках с помощью стереокиносъемки, проведенной в ночь с 18 на 19 июля 2013 г. вблизи

Москвы. Выполненная стереофотограмметрия и анализ спутниковых данных позволил провести обратное лучевое трассирование наблюдавшихся волн с помощью численной модели распространения гравитационных волн, уверенно указавшее на источник этих волн в районе тропосферного фронта окклюзии.

Глава 1. Обзор методов и результатов изучения пространственно-временных свойств мезосферной облачности

1.1. Методы и важнейшие достижения изучения серебристых облаков.

Систематические наземные наблюдения позволили установить ряд особенностей С.О., первыми из которых стали сезонность, то есть появление феномена только в летнее время, и возможность наземного наблюдения исключительно в сумеречном сегменте неба. Не менее важной и интересной особенностью облаков является их пространственная структура, в которой часто прослеживаются периодические образования. Их движение и развитие (за время наблюдений) были выявлены вскоре после их обнаружения. Оценки скоростей движения показали, что они составляют в среднем около 65 м/с (Бронштэн, 1984). Сравнительно недавно (вторая половина 20 века) стало ясно, что наблюдаемые невооруженным глазом периодические структурные образования отображают картину распространения в атмосфере внутренних гравитационных и сдвиговых волн (см. (Dalin, et al. 2010)). В свою очередь, крупномасштабные поля С.О. в умеренных широтах находятся под управлением планетарных волн (Kirkwood and Stebel, 2003; Шефов и Семенов, 2004).

Эти выводы позволили рассматривать серебристые облака как важный источник информации о волновых процессах в верхней атмосфере.

1.2. Высоты и движение С.О. по данным визуальных наблюдений с применением метода триангуляции, а также с помощью теодолитных измерений и фотосъемок.

Данные о высотном распределении облачности впервые были получены с помощью проведения триангуляционных измерений первооткрывателями

феномена Цераским и Йессе (Dalin et al., 2012). По результатам триангуляционных измерений, выполненных на протяжении около 100 лет, средняя высота облаков составила 82,97 км (Бронштэн, 1984). При этом крайние значения высот по данным Штермера, Витта, Дирикса, Францмана оценивались как 73,5 и 94, 5 км (Бронштэн, 1984; Бронштэн, Гришин 1970). Несмотря на сложность и ограниченную величиной точность триангуляционных измерений (около 1 км) эти результаты неплохо согласуются с современными данными высокоточных (± 100 м) лидарных измерений (Lübken, Rapp, 2004).

Вскоре после открытия серебристых облаков последовала целая серия исследований по изучению скоростей их перемещений. Уже в 1889 г. Йессе определил скорости движения С.О. и получил разброс значений от 40 до 177 м/с (Jesse, 1890). Практически все последующие измерения скоростей оказались в хорошем согласии с полученными Йессе данными. По измерениям за 1885-1965 гг. было получено среднее значение скорости движения С.О. – 65 м/с и был определен (Fogle, Haurwitz, 1966) средний геодезический азимут перемещения серебристых облаков – 240 градусов. Таким образом, было выявлено преимущественное направление воздушных течений в летней мезопаузе – с северо-востока на юго-запад, что также хорошо согласовывалось с результатами Йессе. В основном упомянутые методы, с помощью которых получены данные о высотном расположении и скоростях движения С.О., развивались на основе фотографических наблюдений. В продолжение длительного периода фотографирование серебристых облаков было нацелено на решение узкого круга специальных задач. В основном, имеющаяся большая часть данных о серебристых облаках была получена путём визуальных наблюдений (т.е. невооруженным глазом).

Развитие данного метода потребовало ведения систематического патрулирования сумеречного сегмента неба с целью обнаружения полей С.О. и в случае их видимости – регистрации важнейших признаков: яркости,

морфологических форм, угловых размеров полей. Следующие данные заносятся в журнал патрульных наблюдений каждые 15 минут: дата, время, наличие поля, яркость, тропосферная облачность, морфологические формы, азимуты и высоты крайних точек облачного поля. Вместе с этим в журнале регистрируется информация о метеорологических условиях, включающая в себя процентное распределение площади тропосферных облаков в сумеречном сегменте.

Визуальные наблюдения дают значительно более полную информацию о С.О., если осуществляются в сети наблюдательных пунктов. Первой успешной реализацией такого подхода в проведении регулярных наблюдений С.О. стала организация сети пунктов во время Международного Геофизического Года (МГГ, 1957-1958). К началу МГГ была разработана и издана подробная инструкция Гришина (1958), которая содержала рекомендации по организации наблюдений за С.О. Созданная в период МГГ и имевшая свое продолжение в 60-е годы XX века сеть наблюдений осуществлялась в 67 странах мира, при этом только в СССР насчитывалось 200 пунктов с охватом широтно-долготного диапазона $52-60^{\circ}$ N и $23-104^{\circ}$ E (Бронштэн и Гришин, 1970). По результатам работ по программе МГГ был собран огромный массив статистических данных, включающий время начала и конца появления серебристых облаков в каждый сезон, их морфологию и оценку видимой яркости по глазомерной шкале.

В настоящее время с помощью сети, регистрирующей С.О., осуществляется автоматическая киносъемка С.О. каждую ночь в течение всего летнего сезона в пунктах международной сети Северного полушария (САФСО). Начало сети САФСО было положено в 2004 г.; тогда она состояла всего из трех пунктов: Москва и Новосибирск (Россия) и Лунд (Швеция) (Dubietis et al., 2011). В настоящее время сеть непрерывно развивается и охватывает уже восточное и западное полушария. С 2016 г. в сетевой фотосъемке участвует и Северо-Казахстанский университет.

1.3. Лидарные измерения структуры С.О.

Значительное продвижение в определении пространственного расположения и структуры поля С.О. стало возможным благодаря применению лидарного зондирования верхней атмосферы Земли. Физическая сущность метода весьма близка радиолокации, однако, есть и отличия. Прежде всего, лидарным измерениям соответствуют малые размеры поля зрения (хотя сканирование по углу при лидарном зондировании не представляет собой серьезной проблемы для современной техники, но оно значительно ухудшает временное разрешение и поэтому имеет ограниченное применение для мезосферных исследований).

К достоинствам лидарного зондирования следует отнести возможность круглосуточной регистрации аэрозольных слоев в верхней атмосфере. Рэлеевские и резонансно-флюоресцентные лидары дают возможность измерять высоты облачных слоёв, а также определять вертикальные профили температуры.

Применение методики доплеровского анализа отражённого сигнала позволяет определить направление и скорость движения воздушных потоков, а также характеристик турбулентности в облачных слоях. Изменение характеристик поляризации рассеянного лазерного излучения позволяет сделать выводы о форме аэрозольных частиц. В частности, полученные результаты свидетельствуют о несферичности аэрозольных частиц С.О (Rapp and Lübken, 2004).

Наиболее успешно лидарные исследования С.О. развиваются в Германии, Норвегии и Швеции, где в, частности, проводились исследования вариации высотного распределения облачности. Пункты лидарного зондирования для решения этой задачи располагались на разных широтах от Kühlungsborn (54,1°N, Германия) до ALOMAR (69,3°N, Норвегия) и архипелага Шпицберген (78, 2°N,

Норвегия). С целью учёта зависимости рассеивающих свойств облачной среды от размера частиц, использовались лазерные излучатели разного типа с довольно широким набором длин волн, от минимального значения 355 нм (ALOMAR) и далее 532 нм (Kühlungsborn, ALOMAR), 770 нм (Шпицберген) до предельно длинноволнового излучателя на 1064 нм (ALOMAR) (Wilms, Rapp, Hoffmann et al., 2013).

В итоге более 2000 часов лидарного зондирования на разных широтах удалось с высокой точностью определить среднюю высоту поля серебристых облаков с точностью не хуже 100 м (Lübken, Baumgarten, Fiedler et al., 2008). Такая точность существенно превосходит аналогичную характеристику тригонометрических определений высот С.О. Показано также, что не наблюдается значимого увеличения средней высоты поля С.О. с возрастанием широты. Средняя по широтам и сезонам высота облачного поля оказалась равной 83.33 км (Lübken, Baumgarten, Fiedler et al., 2008) при стандартном отклонении 1.04 км.

1.4. Исследование серебристых облаков с использованием орбитальных аппаратов.

Прямые измерения параметров мезосферы и аэрозольных образований в ней возможны при использовании летательных аппаратов. Единственно возможным в данном случае их тип – это ракеты. Ракетно-гранатный метод измерения температур, реализованный при испытаниях первых образцов баллистических ракет, позволил выявить существование абсолютного атмосферного температурного минимума на уровне мезопаузы в летний период. Это открытие, а также непосредственная ракетная регистрация ледяных частиц С.О., сыграли ключевую роль в подтверждении гипотезы Хвостикова о ледяной природе серебристых облаков (Хвостиков, 1952).

Наземные наблюдения и ракетные измерения С.О. при всех своих положительных качествах страдают пространственной ограниченностью сбора данных. Исследования серебристых облаков из ближнего космоса, представляют определённые преимущества перед наземными наблюдениями: почти отсутствует аэрозольное рассеяние света, которое значительно в нижних слоях атмосферы (до 100% при наличии тропосферной облачности), практически отсутствует поглощение слоем озона и водяным паром, что позволяет регистрировать ультрафиолетовый и инфракрасный спектр С.О. Кроме этого, наблюдения из космоса позволяют осуществлять глобальный охват явления за сравнительно короткое время и независимо от погоды. Над океанами и на широтах более 70° измерения со спутники становятся чуть ли не единственным источником информации о С.О.

Первые визуальные и фотографические наблюдения полей серебристых облаков были выполнены с борта пилотируемых КА в 1965 г. А.А. Леоновым с космического корабля «Восход 2», а затем С.О. зафиксированы в 1973 г. П. Вейцем с борта орбитальной станции «Скайлэб». Благодаря неоднократным наблюдениям российских космонавтов удалось выяснить, что в видимом свете серебристые облака наблюдаются всегда в лимбовой области («с ребра»), в узком слое атмосферы угловой толщиной около 2.5° вблизи края диска планеты, но никогда сверху на фоне Земли; максимальное время одного наблюдения составляет 10 – 15 минут, а чаще всего 5 – 7 мин (из-за большой скорости орбитальной станции на высоте примерно 350 км); повышенной концентрации или частоты появления облаков над какими-либо областями (вулканами, материками, горными массивами) при этом обнаружено не было (Далин, Перцев, Ромейко, 2005).

Однако, наблюдения С.О., проводимые космонавтами, носили эпизодический характер из-за крайне уплотнённого графика работы космонавтов, заполненном до предела огромным количеством экспериментов.

Поэтому в основном прогресс в спутниковых исследованиях С.О. был достигнут при помощи работающей автоматически специализированной спутниковой аппаратуры.

Впервые автоматическая регистрация С.О. из космоса была проведена спутником OGO-6 в 1969-1970 гг. (Donahue et al., 1972). Затем к исследованию С.О. приступили спутники Nimbus-7, SME, ERBS, UARS, SPOT, MSX, SNOE, Envisat и др. (DeLand, Shettle, Thomas, Olivero, 2006). На спутниках разрабатывались и устанавливались бортовые приборы такие как: OSIRIS (спутник Odin), SHIMMER (спутник STPSat-1), - оба прибора были созданы для получения наблюдательных данных о серебристых облаках за длительные интервалы времени (Russell, Rong, Hervig et.al., 2014). Для изучения С.О. важны исследования также фоновых характеристик мезосферы (спутники NASA «TIMED» (2002-2011 гг.) и «Aura» (2005-2011 гг.).

Вместе с тем постановка изучения крупномасштабной пространственной структуры С.О. и её изменения в различных масштабах времени на новом качественном уровне стала возможна исключительно благодаря наличию данных мониторинга мезосферной облачности, проводимого с помощью спутника AIM (The Aeronomy of Ice in the Mesosphere). Поскольку эти данные широко используются в диссертации, здесь приводится краткое описание орбиты и соответствующей измерительной техники.

Космический аппарат, запущенный в 2007 году, движется по солнечно-синхронной орбите (перигей – 570.0 км, апогей – 583.0 км, наклонение – 97.8°, период – 96 мин). Прием данных и управления аппаратом производится при помощи двух 11-ти метровых антенн, установленных на станциях слежения в Норвегии и на Аляске.

Проект нацелен на решение шести задач, первые пять из которых связаны с изучением механизмов и условий формирования мезосферных облаков. Шестая задача сложнее и относится к связи феномена С.О. с изменениями

климата в области мезосферы. Для достижения этих целей спутник AIM имеет комплект научной аппаратуры:

1. Прибор SOFIE (Solar Occultation For Ice Experiment). Прибор SOFIE использует покрытия Солнца (Землей) для исследования С.О. и измерения следующих атмосферных параметров: температуры, углекислого газа, метана, окиси азота, озона, аэрозолей.

2. Прибор CDE (Cosmic Dust Experiment). Прибор разработан для измерения потока пылевых частиц, входящих в верхнюю атмосферу Земли. Он установлен на аппарате в направлении на зенит (от поверхности Земли) и имеет большое поле зрения для регистрации частиц.

3. Прибор CIPS (Cloud Imaging and Particle Size experiment). С помощью этого прибора (с ориентацией в надир, т.е. отвесно к земной поверхности) решаются следующие задачи:

- панорамное изображение в ультрафиолетовых лучах с обзором 120° х 80° , что соответствует площади на поверхности Земли 1140 х 960 км;
- изучение светорассеяния от частиц С.О. на высоте 82 км;
- исследование морфологии С.О.;
- измерение размеров частиц С.О.;
- множественная экспозиция отдельных наиболее интересных элементов С.О. с высоким пространственным разрешением не хуже 2 км.

1.5. Статистическое обобщение свойств полей С.О., определяемых по наземным и космическим наблюдениям.

Еще в конце 19 века исследователи серебристых облаков получили первые результаты по статистическому обобщению пространственно-временных свойств полей С.О., иначе говоря, их климатологии (Jesse, 1896; Покровский, 1897). Новые климатологические обобщения поведения С.О., выполняемые на

все более высоком уровне, появлялись на протяжении 20 века (Астапович, 1939; Васильев, 1967; Бронштэн и Гришин, 1970; Gadsden and Schröder, 1989).

Широтная зависимость. Обобщения наземных наблюдений С.О. за несколько лет в различных пунктах СССР или Северного полушария позволили построить гистограммы количества появлений в области широт $42.5 - 75^\circ$ с максимумом на $57.5 - 67.5^\circ$ с.ш. (см., например, (Бессонова, 1963)). Однако следует отметить, что такие гистограммы не учитывают разницу ни в количестве ясных ночей, ни в возможной продолжительности наблюдения, ни в числе наблюдателей в различных широтных диапазонах. Учет первых двух факторов позволил Громовой (1963) получить редуцированные гистограммы с эффективным максимумом появления на широтах $52.5 - 57.5^\circ$ с.ш. В южном полушарии из-за незначительной доли суши на нужных широтах наземные наблюдения не позволяют исследовать широтный ход появляемости С.О. В очень редких случаях С.О. наблюдаются значительно ближе к экватору (Далин, Ромейко и др., 2015), но не все сообщения о С.О. на низких широтах являются однозначно достоверными. Поскольку лидарная сеть, позволяющая регистрировать С.О., является еще более редкой, чем сеть наземных визуальных и фотографических наблюдений, она не применима для исследования широтной зависимости появляемости С.О. А вот спутниковые наблюдения С.О., особенно в высоких широтах, дают ценную информацию об этом. Оказалось, что над полярными и приполярными районами в летний сезон постоянно присутствует почти сплошная полярная шапка С.О., тогда как над более низкими широтами поля С.О. становятся перемежающимися. По данным спутника Nimbus-7 на длине волны 252 нм вероятность появления С.О. в поле зрения спутника, меньше 2% на широтах до 65° , а выше 65° резко растет и достигает на широте 82° значения 10-12%. Альbedo С.О. на этой длине волны растет с широтой приблизительно линейно, увеличиваясь почти вдвое от широты 52° до широты 82° (De Land et al., 2007). Де Ланду и Томасу (De Land and Thomas, 2015)

удалось на основе измерений нескольких спутников оценить среднесезонное содержание льда в С.О. в зависимости от широты за период 1980-2015 гг. Соответствующие их графикам средние оценки показаны в таблице 1.

Таблица 1. Среднесезонное многолетнее содержание льда в С.О. в зависимости от широты по (по данным (DeLand, Thomas, 2015)).

Диапазоны широт	50° - 64°	64° - 74°	74° - 82°
Северное полушарие	60 г/км ²	80 г/км ²	95 г/км ²
Южное полушарие	60 г/км ²	75 г/км ²	90 г/км ²

Высоты. Лидарные измерения позволяют определять не только среднюю высоту, но и вертикальную толщину слоя С.О. По данным лидарных измерений над Аломаром (69° N) в течение 10 лет (Kaifler et al., 2011) нижняя граница слоя находилась в наиболее характерных случаях в интервале 81,5 – 82,5 км, верхняя – от 83,5 до 84 км, а толщина слоя составляла 1.5 – 1.8 км. Однако, отдельные значения высоты С.О. (и лидарные, и триангуляционные) могут сильно отличаться от средней высоты. Так, триангуляционные измерения С.О. на мезосферном фронте показали связанный с фронтом подъем С.О. до высоты 96 км (Dalin, et al., 2013).

Суточный ход. При наземных наблюдениях С.О. изменения глазомерных оценок яркости С.О. в течение ночи в большой степени определяются зависимостью рассеяния частицами облаков от угла погружения Солнца, а также фоновым рассеянным в атмосфере солнечным светом, сильно зависящим от угла погружения Солнца. Однако ход яркости С.О. в течение ночи не исчерпывается зависимостью от угла погружения. Еще исследователи 19 века обратили внимание на то, что С.О. после полуночи, как правило, интенсивнее, чем до полуночи (Покровский, 1897). Впоследствии обнаружилось не только послеполуночное увеличение яркости, но и увеличение частоты появления С.О.

по сравнению с вечерними или среднесуточными значениями, что было подтверждено на большой статистике наблюдений, проведенных разными, в том числе и лидарными (Fiedler et al., 2005; Kaifler et al., 2011) методами. Обычно эта суточная особенность связывается с влиянием на С.О. суточного и полусуточного прилива (Fiedler et al., 2005). Высота С.О. (Fiedler et al., 2005) и их направление движения (Астапович, 1939) также зависят от времени суток. Для отдельных географических пунктов измерений послеполуночное увеличение активности С.О. не проявляется, что может свидетельствовать о маскирующей роли влияния атмосферных гравитационных волн, которые, по-видимому, имеют локальные географические особенности (Thayer, Rapp et al., 2003). Спутниковые измерения также обнаруживают зависимость альбедо С.О. от локального местного времени, а также его асимметрию относительно полуночи (Shettle, Thomas et al., 2002; De Land, Shettle, et al., 2007).

Сезонный ход частоты появления С.О. можно представить кривой, для которой характерно возрастание от нулевого уровня с мая (иногда с июня), достижение максимума в июле и последующий плавный спад (Васильев, 1967).

Исследователи С.О. обращали внимание, прежде всего, на факт отставания даты максимума их развития от летнего солнцестояния на 10-25 дней. При этом дата максимума с увеличением широты смещается в сторону осени. Максимум появления С.О. запаздывает также относительно сезонного минимума температуры, который, согласно многолетним лидарным измерениям в Кюльонгсборне, 54°N (Gerding et al., 2007)), на высотах 82-90 км располагается на границе июня и июля. Логично предположить, что причина такого запаздывания связана с механизмом образования серебристых облаков, с температурным трендом и с поступлением водяных паров в область мезопаузы. Возможные причины этого запаздывания обсуждаются в (Перцев, 2015), однако его однозначного объяснения пока нет.

Спутниковая статистика мезосферных облаков дает максимум частоты их

появления практически в то же время, что и максимум появления С.О., наблюдаемых с Земли: в районе 16-22 дней после солнцестояния (Olivero, Thomas, 1986); около 15-го дня после солнцестояния одинаково для широт 60, 65, 70° N (De Land et al., 2006). Максимальные площади полярной шапки мезосферных облаков в среднем за 6 лет приходятся на 6 июля, т.е. 14-й день после солнцестояния (см. Главу 2). При этом сезонный максимум частоты спутниковых наблюдений С.О. примерно совпадает с температурным минимумом на соответствующих им широтах 70-80°.

Рассмотренные закономерности в сезонном изменении характеристик полей С.О. дополняются результатами настоящей работы, приведенными в главе 2.

Внутрисезонная изменчивость. Появления и яркость С.О. подвержены значительной внутрисезонной изменчивости, в которой находят определенные периодичности. Наиболее хорошо известны периодичности в 2 и 5 суток, по-видимому, связанные с распространением планетарных волн (Dalin, Pertsev, et al., 2011). Найдены также колебания частоты появления и/или яркости С.О. с периодами 13.8, 14.8, 29.5 суток, связанные с лунными приливами (Кропоткина и Шефов, 1975; Gadsden and Schröder, 1989; Dalin, Pertsev, Romejko, 2006; Перцев, Далин, Перминов, 2015).

Применяемая в нашем исследовании методика позволила выявить определенный набор периодов внутрисезонной изменчивости площади облачного поля. Результаты такого исследования приведены в главе 2.

Межгодовая изменчивость. Как показано еще в ранних исследованиях С.О. (Астапович, 1939) сезонная активность С.О. меняется от года к году. Васильев (1967) установил связь межгодовой изменчивости С.О. с циклами солнечной активности. Межгодовая изменчивость проявляется в сезонно-интегральных характеристиках С.О., таких как число наблюдательных ночей с зарегистрированными С.О. или накопленная за сезон яркость (Ромейко, Перцев,

Далин, 2002), а также даты сезонных начала и конца наблюдений С.О., дата центральной точки сезона и ширина сезона на половине максимума (Dalin, Pertsev, Dubietis et al., 2011). С помощью изучения площади глобального поля С.О. Северного полушария, определяемой по спутниковым данным, нами получены результаты, указывающие как на общие черты в развитии полей С.О. в разные сезоны, так и на некоторые отличия. Соответствующие выводы представлены в последующих главах.

Глава 2. Вариации площади глобального поля серебристых облаков Северного полушария в сезоны 2007–2012 гг.

Серебристые облака и их высокоширотный аналог, полярные мезосферные облака, в летнее время образующие полярную шапку над соответствующим полушарием Земли, обладают сильной изменчивостью, проявляющейся на масштабах времени от десятков минут до десятков лет. Это и многие другие свойства мезосферных серебристых облаков (С.О.) могут быть изучены на основе данных космических наблюдений глобального поля мезосферной облачности. В частности, на основании изучения многолетних данных о параметрах поля С.О. Северного полушария, показано, что не существует принципиальных различий в свойствах наблюдаемых с Земли серебристых облаков и наблюдаемых из космоса полярных мезосферных облаков (Солодовник и Кудабаева, 2011). Единый подход к изучению этих объектов, отличающихся главным образом широтой появления, является общепринятым (Gadsden and Schröder, 1989).

В данной главе представлены результаты изучения свойств мезосферы и глобального поля С.О. на основе данных космического зондирования атмосферы Северного полушария Земли, полученных с помощью аппаратуры CIPS спутника AIM (Russell et al., 2009).

2.1. Характеристики инструмента CIPS AIM

Этот инструмент, предназначенный для получения изображений полей мезосферной облачности в проекции на земную поверхность, состоит из четырех одинаковых камер, расположенных крест-накрест. Каждая из них имеет широкий угол обзора (не менее 120° на 80°). Прибор CIPS позволяет получать изображение С.О. приблизительно в надир с пространственным разрешением 1

х 2 км и около 5 км по краям поля зрения по курсу полёта спутника и в противоположном направлении.

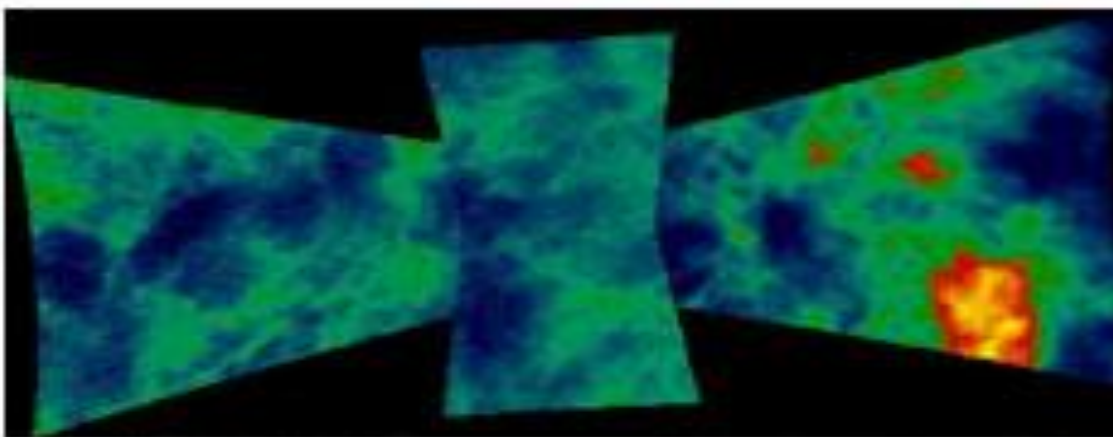


Рисунок 1. Пример типичного изображения, получаемого прибором CIPS (<http://aim.hamptonu.edu/instrmt/cips.html>)

Каждая камера имеет относительное отверстие 1.4, при фокусном расстоянии 35 мм и 25-миллиметровой апертуре объектива. Каждая камера имеет фильтр подавления помех и систему детектирования изображения на базе CCD, ультрафиолетовые фильтры Барристера, центрируемые на 265 нм с полосой пропускания приблизительно 10 нм.

Четыре изображения с камер объединяются при формировании единого изображения, называемое «сценой», с усредненным пространственным разрешением 5 x 5 км (25 км²). «Сцена» показана на рисунке 1. Её пространственный охват составляет 2000 км вдоль траектории движения спутника и 1000 км в ширину. Красные и желтые зоны изображают С.О., попавшие в поле зрения. По мере движения спутника по орбите благодаря перекрытию изображений, любое облако рассматривается семь раз в большом диапазоне углов рассеяния (рис. 2). Камеры CIPS получают изображения каждые 43 секунды с экспозицией в 1 с. В среднем каждая камера CIPS получает 26 изображений за орбиту.

Изменения от орбиты к орбите особенностей в структуре и яркости С.О. дают информацию относительно горизонтальных движений облаков и времени жизни ледяных частиц. Благодаря этому впервые стали возможны количественные сравнения данных CIPS с глобальными моделями атмосферной циркуляции, поскольку одновременно с изображениями спутник получал данные о температуре, содержании водяного пара и других газов, а также концентрации метеорной пыли, то есть параметрах, которые являются ключевыми для формирования льда в мезосфере.

2.2 Технология формирования полос изображений С.О. на основе данных CIPS

Изображение глобального поля С.О. состоит из 15 полос, что соответствует 15 орбитам ИСЗ за сутки. Каждая из орбитальных полос содержит 27 изображений, выполненных каждой из четырёх камерой. В соответствии с расположением отдельных камер они имеют собственные обозначения: РХ, МХ, МУ, РУ (рис. 2). Камеры на устройстве CIPS взаимно ориентированы в системе координат с X–Y–Z, соответствующей направлениям вдоль движения спутника, перекрестной дорожки и обратному относительно курса направлению. В названиях камер «Р» означает «плюс», а «М» – «минус» относительно системы координат.

Роли камер различны. Так камеры РХ получает 30 изображений в области покрытия приблизительно 8000 км вдоль орбиты и приблизительно 900 км в направлении перекрестной дорожки.

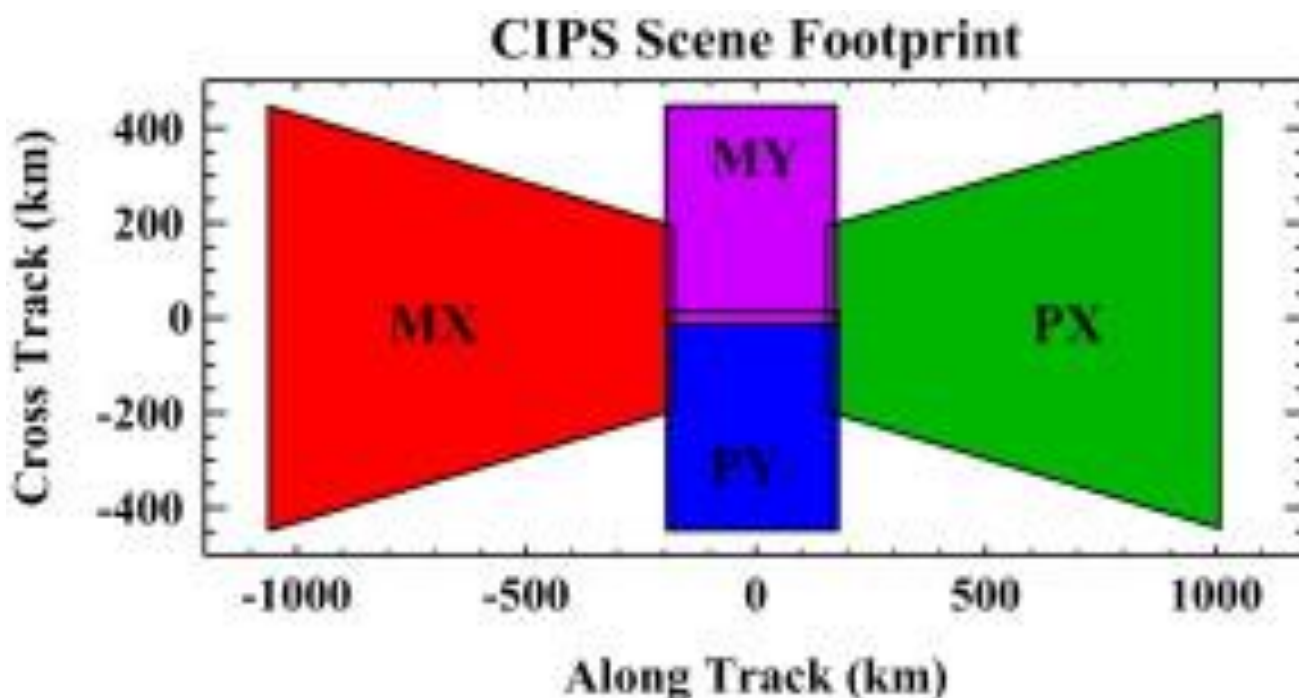


Рисунок 2. Прибор CIPS. Обозначение камер.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682613001831>)

Различия в ширине изображений, получаемых отдельными камерами, объясняются исходя из простых геометрических соображений.

2.3. Изображения, получаемые прибором CIPS, и их характеристики

С учетом геометрических соображений полное перекрытие полос изображений на околополярной орбите происходит в широтной области выше 70 градусов, так что почти вся полярная шапка охвачена 15-ю орбитальными полосами. Однако, при переходе к умеренным широтам плотность охвата изображениями облачного поля уменьшается и на широте 60 градусов, к примеру, составляет около 62%. (рис. 3)

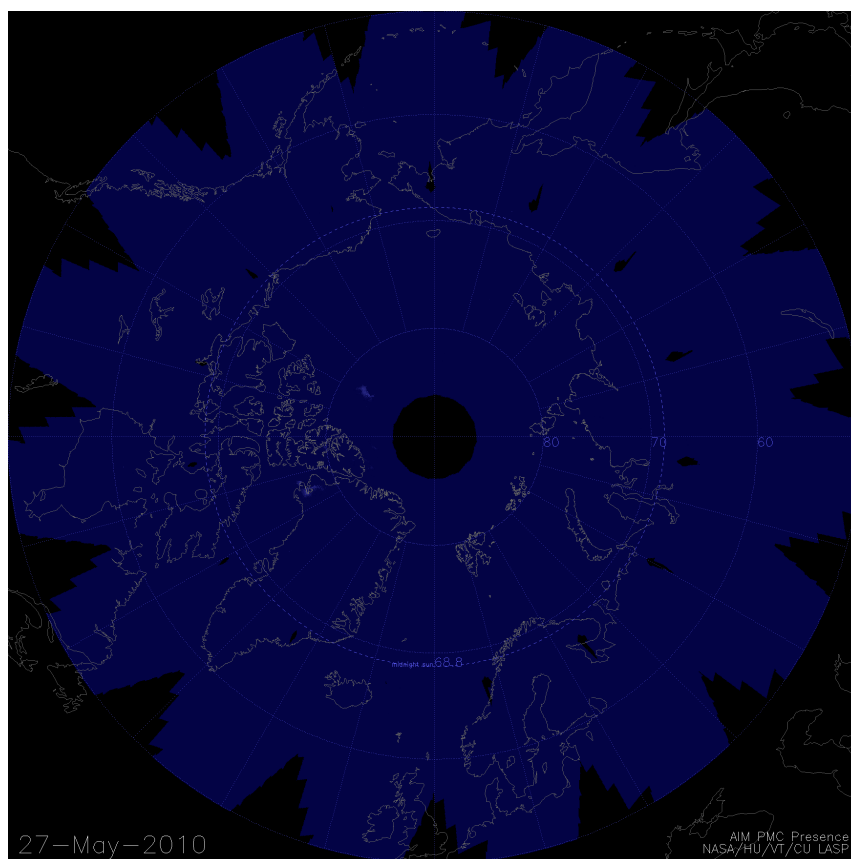


Рисунок 3. Пример изображения, получаемое прибором CIPS
 (<http://lasp.colorado.edu/aim/browse#images.php>)

Технология получения изображений полей серебристых облаков камерами CIPS схематически проиллюстрирована на рисунке 4.

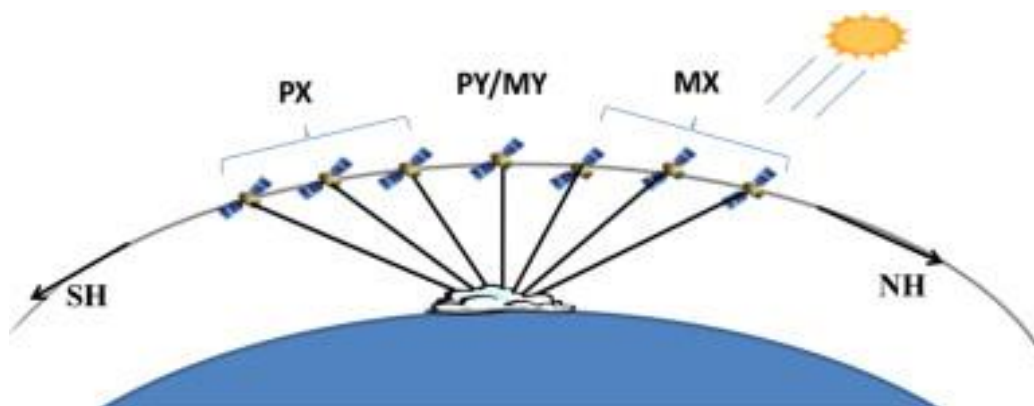


Рисунок 4. Схематическая иллюстрация технологии получения изображений полей С.О. камерами CIPS.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682613001831>)

Из рисунка понятно, что на основании семи измерений можно изучить угловую зависимость рассеивающих свойств облачных частиц. Здесь показано и то, какие именно камеры формируют изображение данного облачного элемента при различных положениях спутника на орбите (по три изображения от РХ и МХ камер и одно от камеры низшей точки РУ или МУ). Стрелки указывают на направление спутникового движения в каждом из полушарий Земли. В Северном полушарии выполняются сначала изображения камерой РХ, они сопровождаются камерами РУ/МУ, а затем и МХ. Эта последовательность полностью изменена в южном полушарии. Такой вид проекции выбран для минимизации искажений вблизи центра проекции при равной площади элементов изображения.

Поскольку в диссертации интегральные свойства поля С.О. изучаются на основе их глобальных спутниковых изображений, необходимо детально рассмотреть процесс формирования этих изображений. При интеграции всех орбитальных полос в единое изображение глобального поля С.О. с 2007 по 2012 гг. использовался алгоритм V4.20. При его использовании для получения изображений по спутниковым данным избежать ложного присутствия некоторых, пусть даже совсем незначительных, облачных образований оказалось практически невозможно. Как отмечалось в (Lumpe, et al., 2013), повышение порогового уровня обнаружения шумов, могло привести к утрате полезной информации о наличии облаков на фотоснимках. Поэтому важно для нашего исследования принять, что установленный минимальный уровень шумов для данных CIPS является и порогом обнаружения С.О. соответственно. В этой связи, согласно выше упомянутому алгоритму устанавливается минимальный порог светового потока – $2 G$ ($G = 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$), по которому определяют наличие С.О. на изображениях, интегрированных из нескольких фотоснимков – полос.

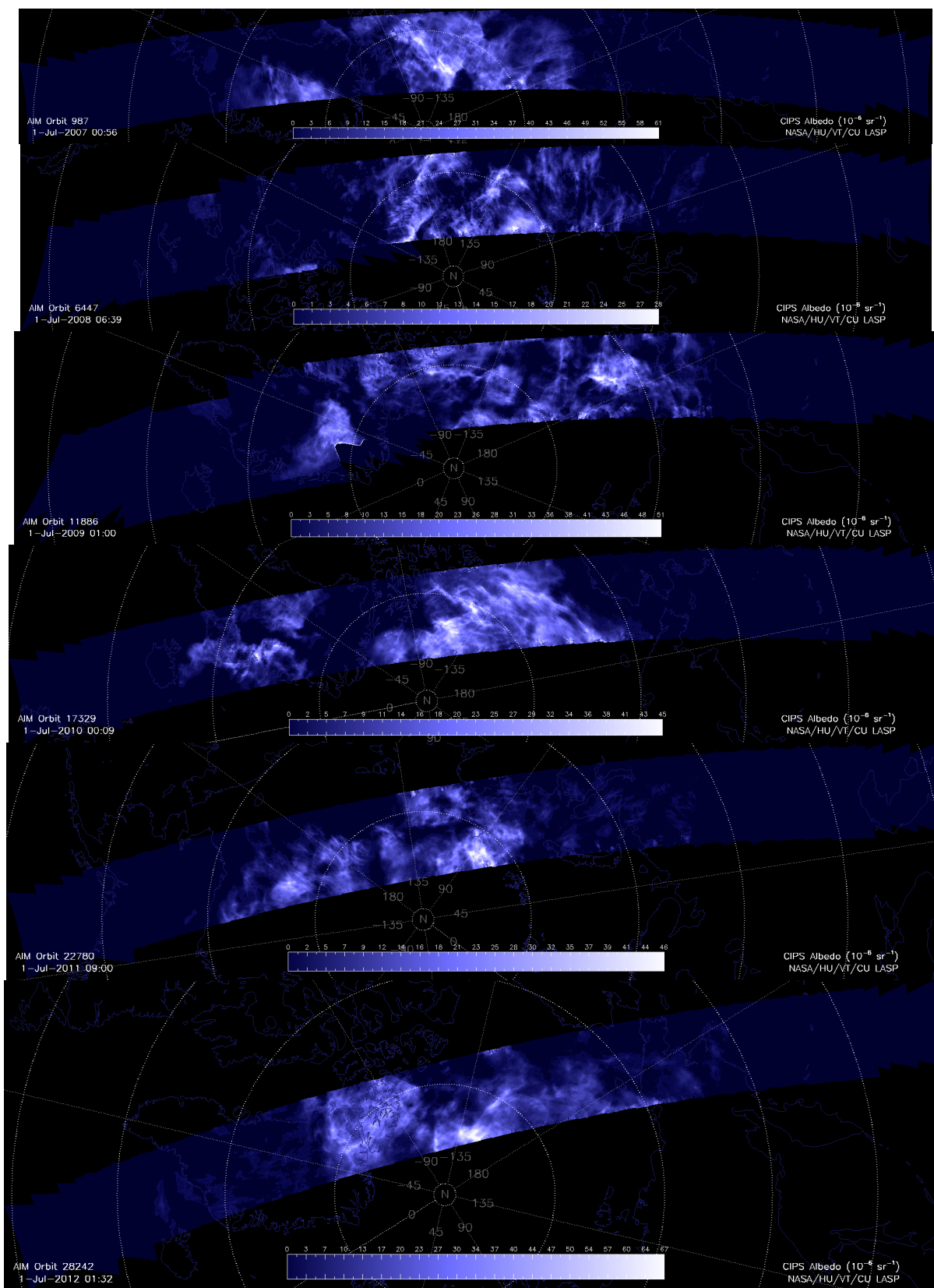


Рисунок 5. Полосы орбит 2007-2012 гг. Пределы охвата широт одинаковы для каждого из сезонов.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682613001831>)

Исследование эффективности обнаружения С.О. аппаратурой спутника, выполненное исследовательской командой программы, показало, что его камеры со 100% уверенностью регистрируют облака при их положении в области терминатора, а также в пределах нескольких градусов южнее и севернее его. Однако, по мере удаления от этой области эффективность регистрации полей С.О. довольно быстро снижается (рис. 6). Этим, в частности, объясняется расхождение в данных о появлении С.О., полученных со спутника и наземными средствами.

По условиям наблюдений (рисунок 6, восходящие орбиты) суточные карты соответствовали двухчасовому диапазону местного солнечного времени, 22÷24 ч для широт 50–70°, затем, с увеличением широты расширяющемся до 5 ч (18÷23 ч) на широте 78° и снова сужающемся до 3 ч (18÷21 ч) на широте 85°.

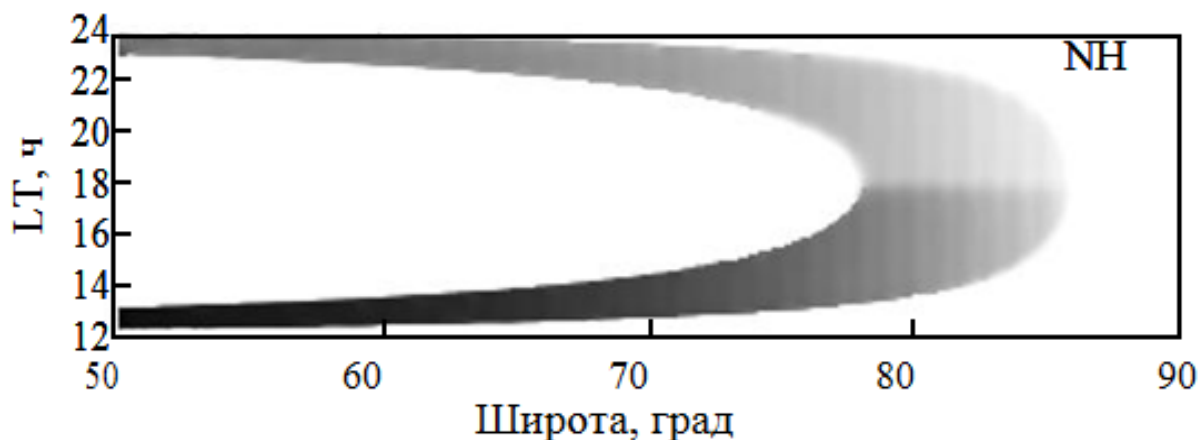


Рисунок 6. Выборка по местному времени прибора CIPS. Темный и светлый участки соответствуют нисходящим и восходящим орбитам.

(<http://lasp.colorado.edu/aim/documentation.html>)

Ограничение исследуемых широт с севера (рис. 6) определяется полем зрения камер спутника при заданном наклонении орбиты. Влияние разброса местного времени в широтном поясе 70-80° едва ли скажется на общности

наших выводов, поскольку главный физический фактор – приток солнечной радиации здесь практически неизменен в условиях полярного дня. Можно ожидать на этих широтах некоторое увеличение разброса результатов за счет мигрирующего полусуточного прилива, но оно должно быть равномерным по всем долготам. При суточном накоплении информация на картах представляется равномерно по всем долготам для одного и того же интервала местного солнечного времени.

2.4. Вычисление площади полей С.О. и их изменений во времени

Оригинальные карты изображений полей С.О. были обработаны посредством специальной программы, разработанной в среде MathCAD (рисунок 7). По результатам обработки найдены площади, занятые С.О., выраженные в виде числа пикселей, которые заняты изображениями полей облачности на каждую дату.

Алгоритм программы предполагает выполнение следующих действий. Изображения полей С.О. трансформировались в матричную форму представления. По совокупности изображений определялось значение фона, которое в пределах отдельного снимка и каждой годичной серии изменялось весьма незначительно (фактически на 1–2 при уровне фона ~ 72 усл. ед.). В дальнейшем значение яркости фона вычиталось (с учетом дисперсии его значения) попиксельно. Вычислялось общее число пикселей с ненулевыми значениями яркости (занятых облаками). Критичное для отличия облака от фона значение яркости отдельного пикселя (~ 100 – 105 усл. ед.) уверенно применимо к ситуации с развитыми облачными полями. При идентификации С.О. учитывалось и влияние служебных символов на картах.

Вводим фотографию в документ, причем только синий ее компонент:

$\Delta_s = \text{READ_BLUE}(\text{"C:\Documents and Settings\Admin\Рабочий стол\фото в bmp(2010\zoom)\cips_sci_3a_2010-177_0420_04.bmp"})$

Вводим размер фотографии (n - горизонталь, m - вертикаль):

$n = 1746$ $m = 1746$

Вводим параметры цвета облаков (a - нижний предел, b - верхний, оставить 255):

$a = 245$ $b = 255$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$A =$

$$B = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{i,j} = 219 \times 10^6$$

$$N = m \cdot n = 3.049 \times 10^6$$

$i = 1..n$
 $j = 1..m$

$$C_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{if } a < A_{i,j} \leq b \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...

$C =$

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{i,j} = 2.829 \times 10^6$$

Количество всех пикселей:

$N = 3.049 \times 10^6$

Количество пикселей с облаками:

$S = 2.829 \times 10^6$

Рисунок 7. Фрагмент программы (MathCad) по обработке изображений CIPS

AIM

Развитие площадей облаков в течение каждого из сезонов видимости представлено на рисунках 8-13 и в табл. 2 и 3.



Рисунок 8. График площади С.О. в сезон 2007 г.

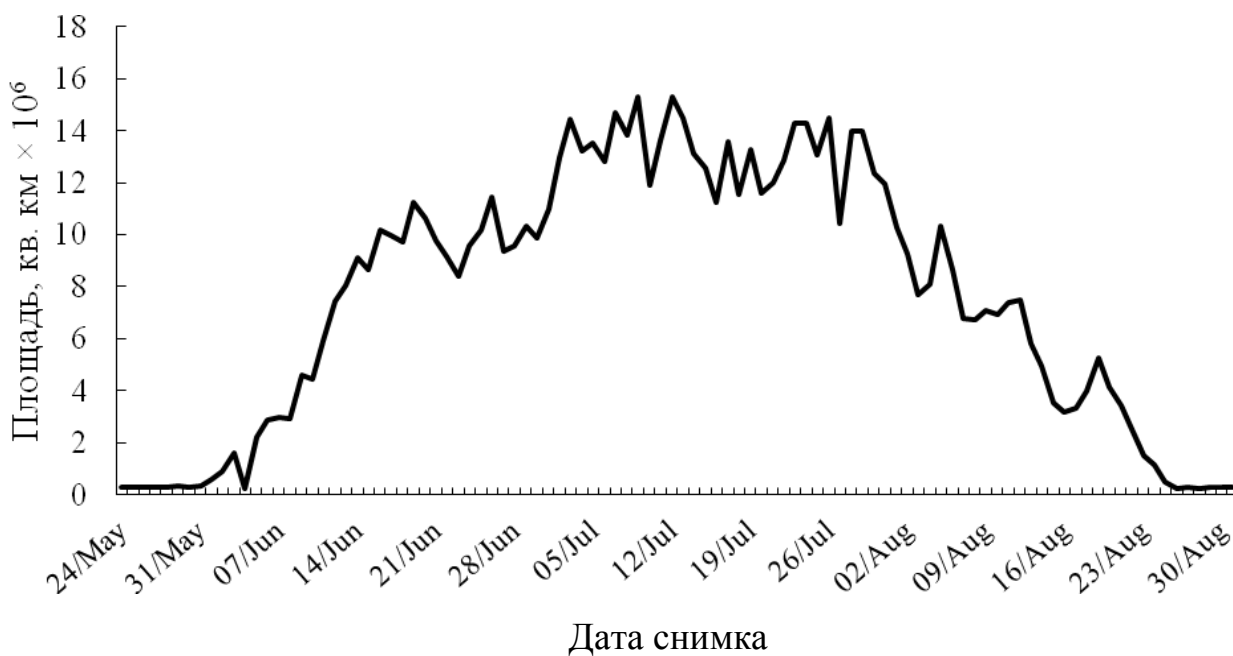


Рисунок 9. График площади С.О. в сезон 2008 г.

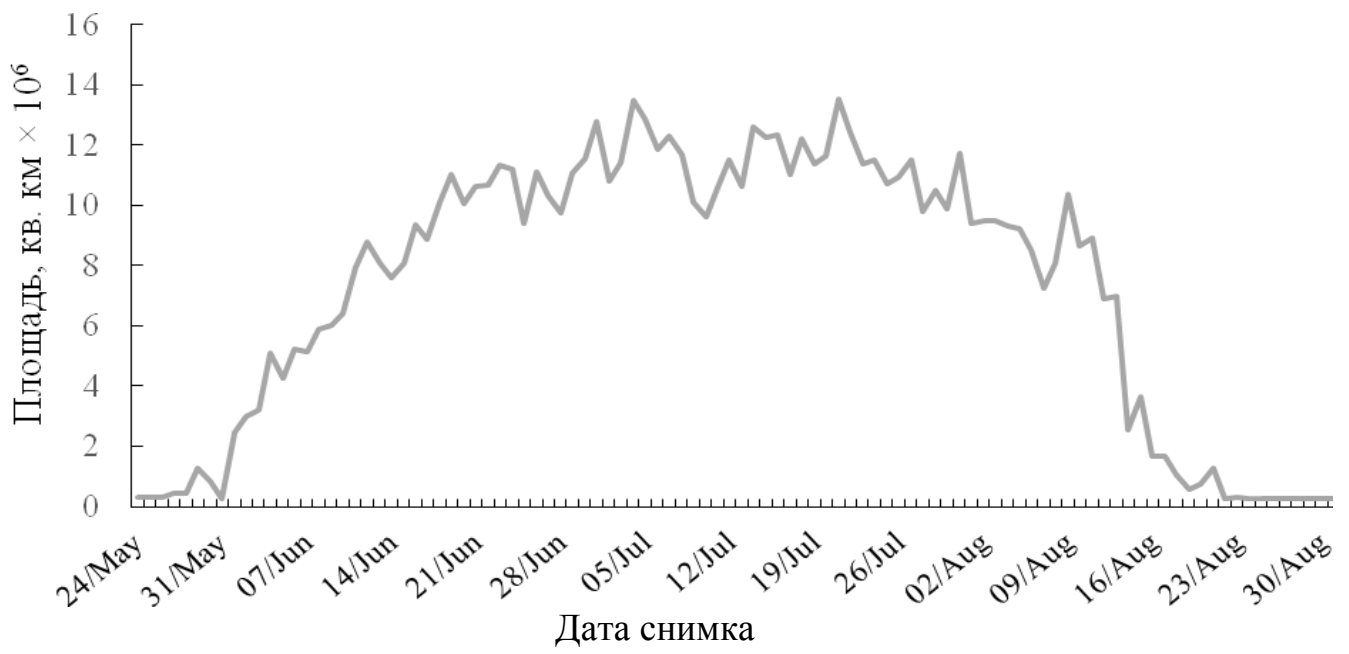


Рисунок 10. График площади С.О. в сезон 2009 г.

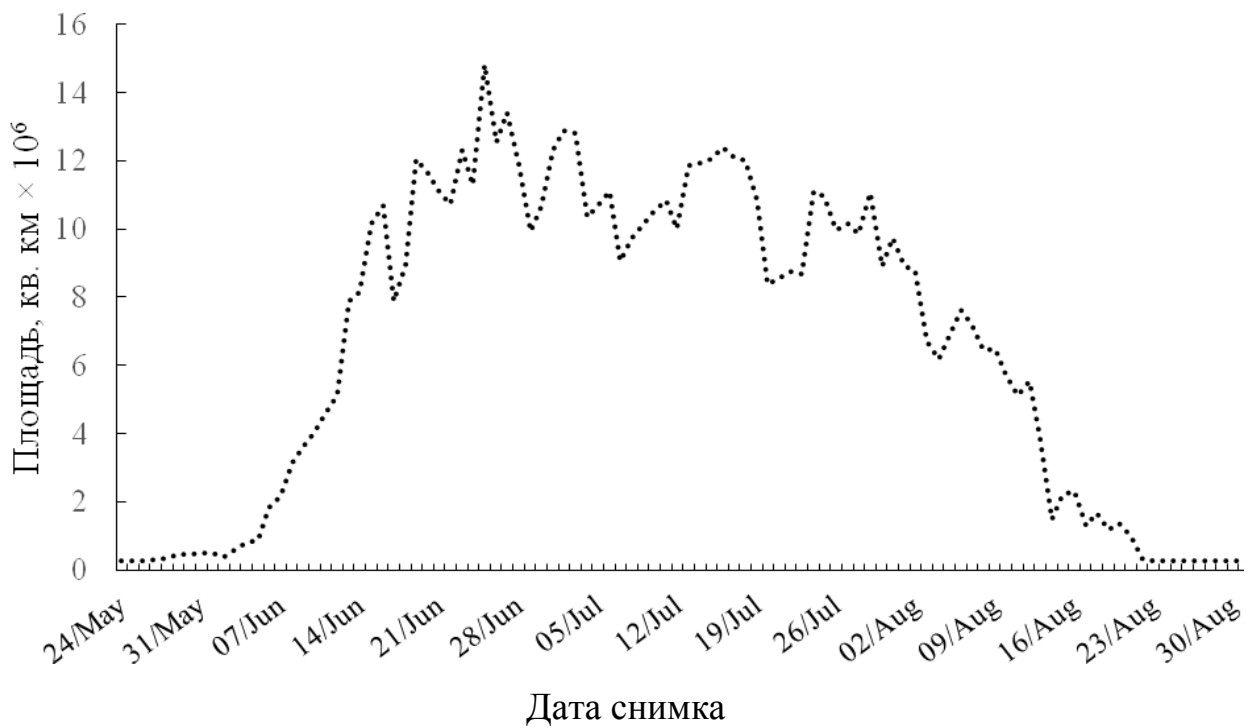


Рисунок 11. График площади С.О. в сезон 2010 г.

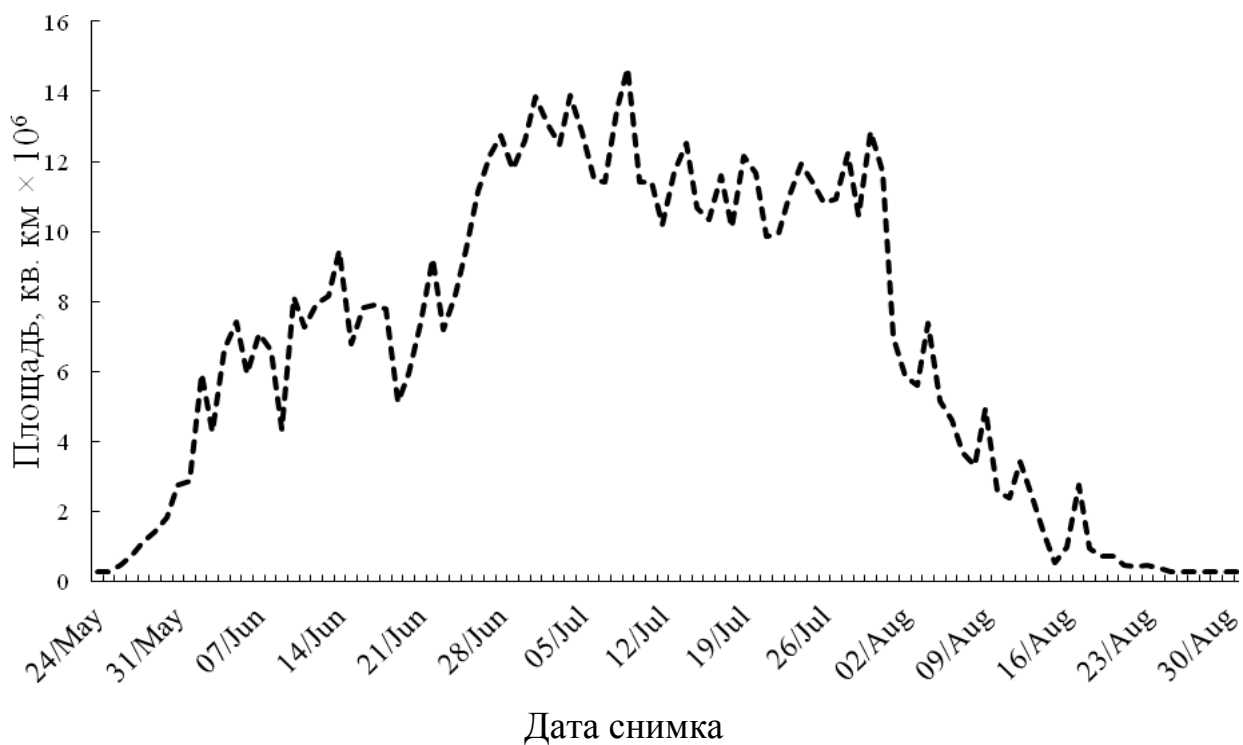


Рисунок 12. График площади С.О. в сезон 2011 г.



Рисунок 13. График площади С.О. в сезон 2012 г.

Таблица 2. Общие площади, занятые мезосферной облачностью на сводных суточных изображениях CIPS AIM за сезоны 2007-2013 гг.

Дата снимка	Кол-во пикселей ($\times 10^5$) в сезон 2007	Кол-во пикселей ($\times 10^5$) в сезон 2008	Кол-во пикселей ($\times 10^5$) в сезон 2009	Кол-во пикселей ($\times 10^5$) в сезон 2010	Кол-во пикселей ($\times 10^5$) в сезон 2011	Кол-во пикселей ($\times 10^5$) в сезон 2012
1	2	3	4	5	6	7
24.май	0,122	0,115	0,116	0,113	0,114	0,108
25.май	0,212	0,116	0,115	0,114	0,115	0,157
26.май	0,280	0,116	0,126	0,114	0,182	0,199
27.май	0,548	0,116	0,175	0,119	0,305	0,378
28.май	0,312	0,117	0,183	0,132	0,451	0,556
29.май	0,344	0,125	0,503	0,179	0,573	0,316
30.май	0,390	0,116	0,332	0,179	0,726	0,626
31.май	0,622	0,129	0,112	0,203	1,108	0,858
01.июн	0,670	0,238	0,983	0,203	1,148	1,488
02.июн	0,871	0,358	1,201	0,149	2,376	1,623
03.июн	1,009	0,643	1,281	0,242	1,713	1,502
04.июн	1,378	0,102	2,041	0,317	2,649	1,946
05.июн	2,015	0,884	1,696	0,348	2,962	2,305
06.июн	1,500	1,153	2,085	0,731	2,369	2,729
07.июн	2,753	1,192	2,064	0,871	2,826	2,448
08.июн	2,219	1,172	2,348	1,264	2,640	1,538
09.июн	2,216	1,844	2,399	1,442	1,743	2,471
10.июн	2,283	1,774	2,565	1,619	3,251	3,135
11.июн	2,958	2,374	3,186	1,837	2,907	2,331

12.ИЮН	1,943	2,974	3,518	2,045	3,167	2,378
13.ИЮН	2,639	3,226	3,225	3,161	3,256	2,777
14.ИЮН	2,904	3,640	3,044	3,254	3,775	2,317
15.ИЮН	3,107	3,461	3,232	4,060	2,714	2,018
16.ИЮН	3,162	4,068	3,745	4,272	3,132	2,145
17.ИЮН	3,569	3,998	3,546	3,155	3,151	2,998
18.ИЮН	3,378	3,894	4,049	3,578	3,107	3,309
19.ИЮН	3,772	4,489	4,405	4,819	2,055	3,120
20.ИЮН	4,760	4,262	4,026	4,652	2,370	3,820
21.ИЮН	4,520	3,914	4,254	4,433	2,954	3,167
22.ИЮН	4,954	3,663	4,277	4,296	3,693	4,074
23.ИЮН	4,859	3,356	4,533	4,921	2,884	4,798
24.ИЮН	4,227	3,827	4,489	4,522	3,272	3,996
25.ИЮН	3,776	4,075	3,760	5,928	3,787	4,660
26.ИЮН	5,107	4,585	4,438	5,014	4,463	4,239
27.ИЮН	4,444	3,747	4,132	5,367	4,876	4,024
28.ИЮН	3,947	3,821	3,896	4,758	5,097	5,421
29.ИЮН	3,682	4,136	4,422	3,977	4,716	5,137
30.ИЮН	2,997	3,956	4,630	4,264	5,038	5,008
01.ИЮЛ	3,338	4,394	5,105	4,921	5,534	5,056
02.ИЮЛ	3,260	5,192	4,323	5,157	5,231	4,402
03.ИЮЛ	2,900	5,770	4,564	5,118	4,999	4,675
04.ИЮЛ	3,331	5,296	5,388	4,134	5,562	4,112
05.ИЮЛ	3,239	5,405	5,152	4,283	5,124	5,156
06.ИЮЛ	3,343	5,123	4,737	4,444	4,595	4,096
07.ИЮЛ	3,435	5,874	4,916	3,622	4,558	4,055
08.ИЮЛ	3,572	5,529	4,666	3,894	5,399	4,733

09.ИЮЛ	4,156	6,111	4,045	4,067	5,859	4,509
10.ИЮЛ	4,050	4,771	3,842	4,217	4,570	4,037
11.ИЮЛ	3,999	5,446	4,235	4,336	4,567	5,052
12.ИЮЛ	3,992	6,118	4,612	4,009	4,073	4,438
13.ИЮЛ	4,769	5,794	4,247	4,740	4,682	3,591
14.ИЮЛ	4,629	5,240	5,038	4,782	5,003	3,751
15.ИЮЛ	5,057	5,024	4,895	4,823	4,274	3,891
16.ИЮЛ	4,447	4,496	4,943	4,958	4,132	4,150
17.ИЮЛ	4,861	5,421	4,402	4,836	4,642	4,094
18.ИЮЛ	5,340	4,622	4,893	4,801	4,043	3,712
19.ИЮЛ	5,451	5,299	4,545	4,342	4,857	4,247
20.ИЮЛ	5,063	4,640	4,656	3,354	4,669	3,667
21.ИЮЛ	5,042	4,798	5,418	3,425	3,945	3,954
22.ИЮЛ	4,486	5,149	4,973	3,496	3,979	3,405
23.ИЮЛ	4,923	5,710	4,557	3,471	4,402	3,516
24.ИЮЛ	4,837	5,709	4,598	4,446	4,771	3,453
25.ИЮЛ	4,560	5,219	4,296	4,386	4,552	3,954
26.ИЮЛ	4,565	5,792	4,371	3,989	4,323	4,198
27.ИЮЛ	3,904	4,171	4,605	4,070	4,368	3,357
28.ИЮЛ	4,114	5,588	3,916	3,947	4,886	3,951
29.ИЮЛ	3,530	5,594	4,193	4,431	4,180	3,185
30.ИЮЛ	3,796	4,953	3,951	3,569	5,143	2,842
31.ИЮЛ	3,145	4,781	4,695	3,896	4,678	3,368
01.АВГ	3,607	4,118	3,769	3,567	2,788	3,266
02.АВГ	2,813	3,707	3,787	3,511	2,337	3,219
03.АВГ	3,063	3,082	3,787	2,689	2,244	3,396
04.АВГ	3,546	3,229	3,730	2,471	2,950	1,964

05.авГ	2,741	4,139	3,685	2,741	2,056	2,517
06.авГ	2,849	3,466	3,408	3,055	1,842	2,506
07.авГ	3,303	2,708	2,900	2,875	1,469	2,502
08.авГ	3,467	2,698	3,241	2,580	1,328	2,602
09.авГ	3,799	2,825	4,146	2,590	1,976	2,570
10.авГ	3,030	2,777	3,463	2,295	1,024	2,334
11.авГ	2,233	2,947	3,565	2,045	0,948	2,714
12.авГ	2,697	2,987	2,754	2,219	1,365	1,689
13.авГ	2,535	2,319	2,792	1,546	0,971	1,831
14.авГ	2,249	1,981	1,019	0,587	0,532	0,889
15.авГ	1,964	1,415	1,467	0,878	0,217	1,292
16.авГ	2,346	1,263	0,670	0,932	0,384	0,754
17.авГ	0,985	1,333	0,663	0,523	1,094	0,710
18.авГ	1,200	1,604	0,425	0,670	0,379	0,507
19.авГ	1,830	2,107	0,237	0,478	0,285	0,469
20.авГ	1,727	1,661	0,292	0,551	0,293	0,193
21.авГ	1,194	1,381	0,515	0,395	0,188	0,189
22.авГ	1,122	1,011	0,114	0,131	0,168	0,110
23.авГ	0,523	0,595	0,115	0,109	0,176	0,109
24.авГ	0,575	0,453	0,113	0,108	0,149	0,109
25.авГ	0,652	0,205	0,109	0,107	0,113	0,108
26.авГ	0,210	0,10	0,107	0,107	0,110	0,106
27.авГ	0,107	0,105	0,107	0,107	0,107	0,107
28.авГ	0,108	0,10	0,108	0,107	0,107	0,101
29.авГ	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,104
30.авГ	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,102
31.авГ	0,106	0,106	0,106	0,105	0,106	0,100

На рисунке 14 приведена сводка графиков, изображающих изменение площади поля С.О. в течение всех сезонов наблюдений С.О., зарегистрированных спутником для периодов с 2007 по 2012 годы. Из рисунка можно заметить достаточно близкое расположение эпох максимального развития площади облачных полей, причем даты этих максимумов близки к тем, которые получены задолго до запуска AIM из наземных наблюдений (Бронштэн и Гришин, 1970; Бронштэн, 1984). Дата максимума серебристых облаков довольно уверенно приходится на интервал времени от 1 до 15 июля (Fogle and Haurwitz, 1966). Однако, несмотря на кажущуюся на первый взгляд общую форму сезонного хода всех графиков 2007–2012 гг., свод графиков демонстрирует и межгодовые различия. Интерес представляет сезон 2007 г., когда наблюдался двойной максимум площади С.О. (рис. 8). Аналогичное поведение с двойным максимумом именно для 2007 г. демонстрируют частота появления полярных мезосферных облаков и наблюдаемая массовая плотность льда по данным прибора SOFIE на спутнике AIM (Rong et al., 2012).

Подобное поведение в некоторые годы отмечено и по наземным наблюдениям для частоты появления серебристых облаков (Бронштэн, 1984; Fogle and Haurwitz, 1966). Впрочем, это сравнение не вполне строгое, поскольку для достаточно высоких широт при наземных наблюдениях в прошлом всегда получалась двугорбая сезонная кривая. Здесь сказывалось влияние на условия наблюдений периода белых ночей (Fogle and Haurwitz, 1966).

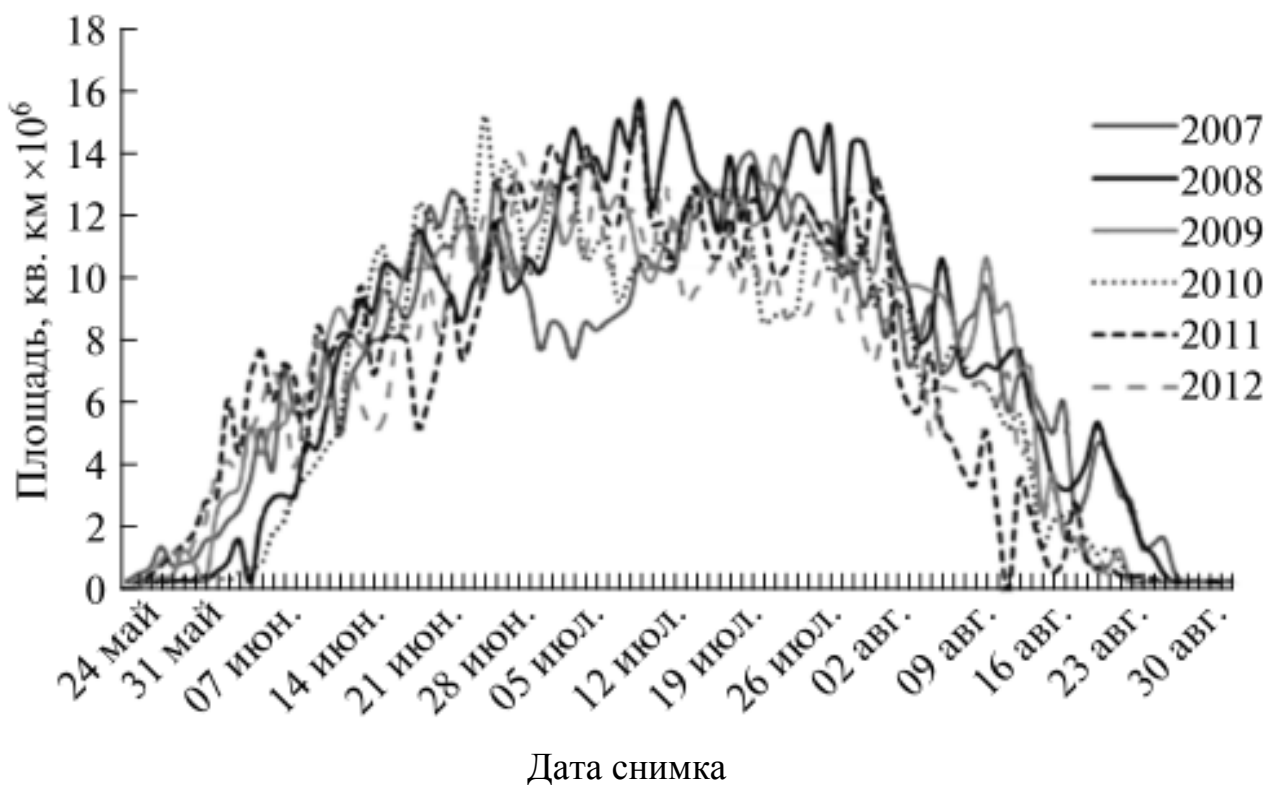


Рисунок 14. Наложение графиков площадей С.О. в период с 2007 по 2012 гг.

2.5. Аппроксимация изменений площади поля С.О. и интерпретация результатов исследования.

Располагая данными об изменениях площади поля С.О. Северного полушария, можно попытаться выявить как общие свойства, так и некоторые особенности процесса формирования полей серебристых облаков в сезоны их видимости разных лет. Первый этап исследования имел целью выявить самые общие закономерности изменения площади облачного поля для каждого сезона. Для этого использована специально разработанная программа в среде MathCad, листинг программы представлен на рисунке 15, позволяющая подобрать аппроксимирующую функцию к графику изменения площади облачного поля.

Mathcad - [Аппроксимация данных ver 1-3]

Вводим данные в расчетный документ:

Выбираем интересующую нас область и производим вычисления:

$$B^{(2)} := \text{submatrix}(A, 3, 86, 4, 4)$$

$$B^{(2)} := B^{(2)} \cdot 10^5$$

$$B^{(1)} := \begin{cases} m \leftarrow 1 \\ \text{for } n_m \in 1..rows(B) \\ \quad Y_m \leftarrow m \\ \quad m \leftarrow m + 1 \\ Y \end{cases}$$

$$B^{(3)} := U_1 \cdot (B^{(1)})^2 + U_2 \cdot B^{(1)} + U_3$$

$$f(x, p) := p_1 \cdot x^2 + p_2 \cdot x + p_3$$

$$U := \text{genfit} \left[B^{(1)}, B^{(2)}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, f \right]$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 3.517 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

Mathcad - [Аппроксимация данных ver 1-3]

$$F(x) := U_1 \cdot x^2 + U_2 \cdot x + U_3$$

$$\sigma := \sqrt{\frac{\sum (B^{(2)} - B^{(3)})^2}{rows(B) \cdot (rows(B) - 1)}}$$

$$C_m^{(1)} := B^{(2)} - B^{(3)}$$

$$i := 1..rows(B)$$

$$D_i := \begin{cases} C_i & \text{if } C_i \geq 0 \\ -1 \cdot C_i & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$E := \begin{cases} m \leftarrow 1 \\ \text{for } n_m \in 1..rows(B) \\ \quad Y_m \leftarrow 3 \cdot \sigma \\ \quad m \leftarrow m + 1 \\ Y \end{cases}$$

	1
1	2.823·10 ⁵
2	2.774·10 ⁵
3	2.732·10 ⁵
4	2.553·10 ⁵
5	2.375·10 ⁵
6	2.615·10 ⁵
7	2.305·10 ⁵
8	2.074·10 ⁵
9	2.694·10 ⁵
10	2.574·10 ⁵
11	2.289·10 ⁵
12	2.83·10 ⁵
13	2.049·10 ⁵
14	1.78·10 ⁵
15	1.741·10 ⁵
16	...

График непрерывной функции, аппроксимирующей экспериментальные данные:

Рисунок 15. Программа MathCad, позволяющая подобрать аппроксимирующую функцию к графику изменения площади облачного поля

На рисунке 16 приведены результаты параболической аппроксимации хода площади облачного поля для сезонов 2007– 2012 гг. Критериями адекватности аппроксимации приняты минимальность числа свободных параметров функции и отклонения от нее исследуемой зависимости. Оказалось, что с хорошей точностью (усредненная ошибка аппроксимации относительно максимального значения площади по сезонам не более 9%) изменение площади С.О. для каждого сезона и суммарно может быть описано параболической функцией.

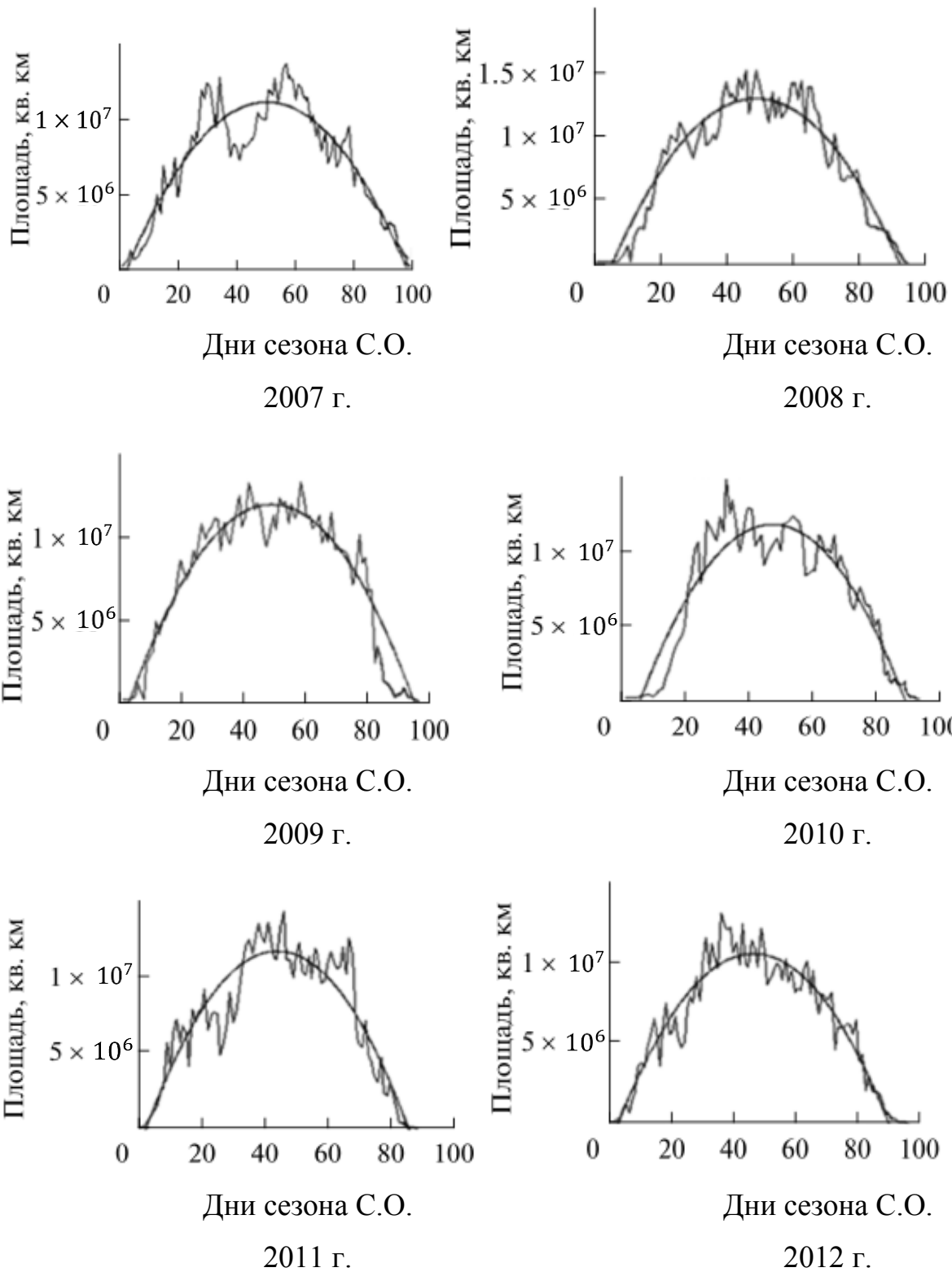


Рисунок 16. Результаты параболической аппроксимации сезонных изменений площади поля серебристых облаков («0» соответствует началу сезона – 24 мая).

Таблица 3. Даты развития площади поля серебристых облаков в сезоны 2007–2012 гг.

Сезон наблюдений	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
Даты максимумов по графикам	26 июня 19 июля	12 июня 26 июля	4 июля 21 июля	25 июня	9 июля 30 июля	28 июня
Даты максимумов по параболич. аппроксимации	12 июля	5 июля	10 июля	2 июля	6 июля	3 июля
Дата начала	24 мая	28 мая	28 мая	25 мая	25 мая	25 мая
Дата конца сезона	27 августа	27 августа	22 августа	22 августа	25 августа	22 августа
Продолжительность сезона (дней)	96	92	87	90	93	90

Эти обстоятельства приобретают особую важность в контексте существования механизма, определяющего образование рекуррентного поля С.О. над полярными областями в летние сезоны, в котором существенная роль отводится конвекции, охватывающей не только тропосферу, но стратосферу и мезосферу.

Следует отметить, что в отличие от наземных визуальных наблюдений прошлого века, совершенно по-иному выглядят графики площади полей С.О., построенные на основе спутниковых данных, в начале и в конце сезона их видимости. Так, серебристые облака в марте–апреле – начале мая, а также в сентябре–октябре, встречающиеся в обзоре (Fogle and Haurwitz, 1966), спутниковыми наблюдениями не отмечены ни разу. Заметим, что последние

результаты совершенно свободны от субъективизма наблюдателя. В этой связи из упоминающихся в работе (Fogle and Haurwitz, 1966) наиболее близкими к современным данным выглядят результаты шотландских наблюдателей, которые также вполне возможно аппроксимировать параболической зависимостью.

Согласно полученным данным, заметно некоторое различие в длительности сезонов видимости С.О., впрочем, незначительное. В частности, первое появление С.О. ранее 24 мая не отмечено ни разу. Эта дата и является условным началом отсчета на графиках. В таблице 4 показаны определенные по результатам аппроксимации даты максимального развития площади поля серебристых облаков.

Температуру и влажность в области образования облаков, меняющиеся по широте, полезно сопоставить с локальными характеристиками С.О. Такое сопоставление успешно проведено в работах (Dalin et al., 2011; Rong et al, 2012)

Таблица 4. Результаты сопоставления кривой частоты появления С.О. (Rong et al, 2012) и площади для сезонов 2007–2010 гг.

Параметры осредненных кривых за 2007-2010 гг.	Дата максимума	Ширина кривой на половине максимума
Площадь С.О.	4 июля	70
Частота появления С.О.	30 июня	81

Площадь, занятая С.О., является интегральной характеристикой полярной мезосферы, хотя и связанной с другими характеристиками С.О., измеряемыми со спутника, прежде всего, с частотой появления и альбедо С.О. Если последние две величины характеризуют локальные свойства С.О., хотя и усредняемые при обработке по всей области их нахождения, то площадь характеризует размеры области, которая по своим физическим свойствам благоприятствует

существованию С.О. Тем не менее интересно сопоставить среднемноголетние кривые площади и частоты появления С.О. по данным того же спутника. Для обеспечения одинакового интервала лет и одной и той же широтной выборки данных использованы результаты Rong et al. (2012), где приведены кривые частоты появления С.О. для сезонов 2007–2010. Соответственно эти кривые и кривые площади из настоящей статьи усреднены по указанным четырем годам. Результаты сопоставления сведены в таблице 4. Возможно, что некоторая разница в датах максимального развития и эффективной ширине сезона для двух характеристик С.О. связана с тем, что из-за геометрии полярной области формирование площади С.О. дают больший вклад более низкие широты, чем в случае осредненной частоты появления.

Необходимо также отметить несомненное методическое преимущество площади как измеряемой характеристики перед альбедо: последнее является значительно более чувствительным к вариациям рассеянного излучения из-за изменения медианных размеров облачных частиц в ансамбле и изменений угла рассеяния вдоль кадра. Так как параметры ансамбля частиц изменчивы и заранее не известны, то приведение альбедо к условиям постоянного угла рассеяния наталкивается на серьезные принципиальные трудности.

Таким образом, в данной работе впервые представлены результаты исследования изменения площади глобального поля С.О. по времени (С.О. в Арктике), выявленные по данным спутниковых наблюдений 2007–2012 гг. Обнаружена закономерность: общий параболический ход исследуемой характеристики глобального поля серебристых облаков Северного полушария. Обнаружено, что отличие графиков изменения площади наблюдаемых полей С.О. от аппроксимирующей функции имеет некоторые индивидуальные особенности в 2007 г., при этом даты максимумов развития облачного поля слабо изменяются от сезона к сезону.

Полученные нами результаты, конечно же, желательно сопоставить с выводами сходных по направлению исследований. Наиболее полно они представлены на сайте посвященном миссии AIM. Так, на рисунке 17 показаны изменения со временем частоты появления (обнаружения) серебристых облаков в области 80 градуса северной широты в сезоны с 2007 по 2016 год.

По этим данным возможно определить примерные временные диапазоны первого появления и исчезновения С.О. Они, как правило, совпадают с датами третьей декады мая и первой декады августа соответственно для всех сезонов. Показательно и то, что графики частоты появления околополярных С.О., имеют примерно такой же параболический вид, что и графики площадей С.О., полученные ранее в нашей работе (Кудабаева, 2015). Это сходство неудивительно, поскольку для данных диапазонов широты площадь мезосферных облаков пропорциональна общей площади поверхности сферы вырезаемого данным диапазоном широт и частоте появления мезосферных облаков.

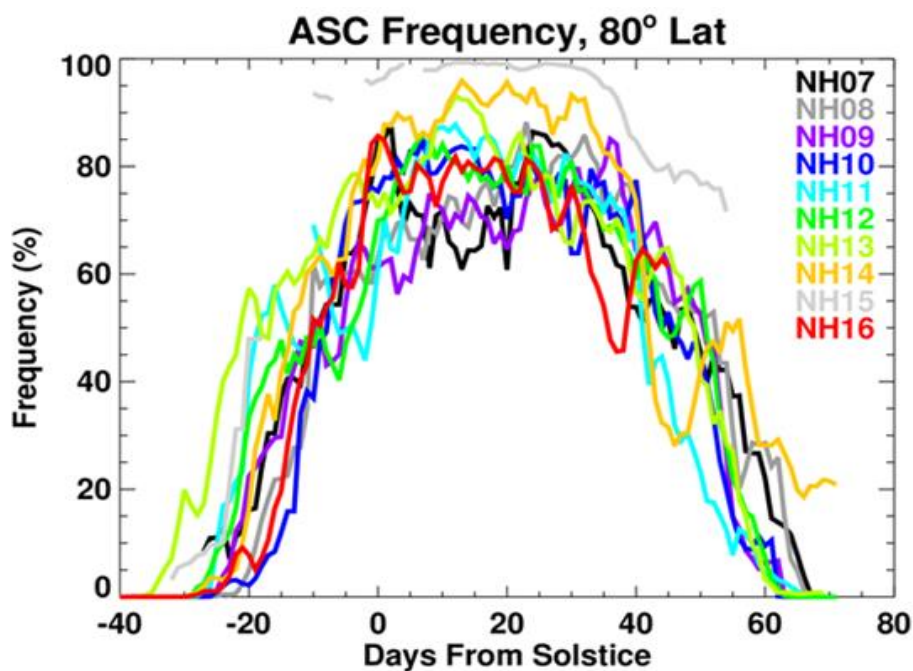


Рисунок 17. График частоты появления С.О. на широте 80° Северного полушария в сезоны 2007-2016 гг (<http://aim.hamptonu.edu/mission/status.php>)

Физический процесс, формирующий летнюю сезонную кривую приблизительно параболического вида, описывающую площадь или вероятность появления мезосферной облачности, в общих чертах ясен. Это – совместное действие сезонных кривых температуры и концентрации водяного пара. По данным спутниковых измерений температура на интересующих нас широтах и высотах имеет минимум в конце июня, а парциальное давление водяного пара медленно растет в течение всего летнего сезона (Rong et al., 2012). Однако роль играют и пространственно-временные отклонения от этой схематической линии. Если рассчитать по спутниковым данным о температуре и влажности вероятность превышения концентрацией или давлением водяного пара уровня конденсации, то для нее можно получить летнюю сезонную кривую, весьма напоминающую обсуждаемые параболы (рис.4 (Rong et al., 2012) с максимумом, примерно совпадающим по времени с максимумом площади. Одна из таких кривых для 2008 г. приведена на рисунке 18 (по (Rong et al., 2012)).

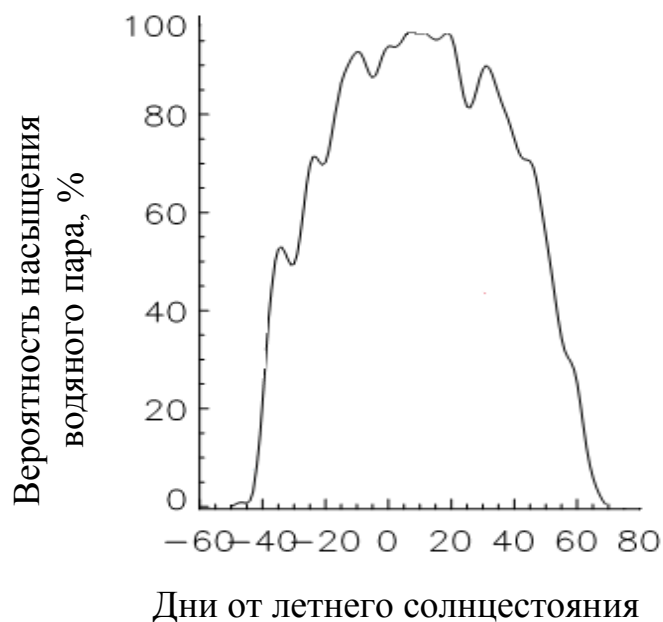
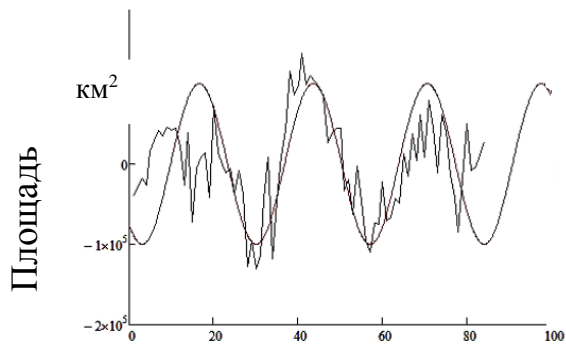
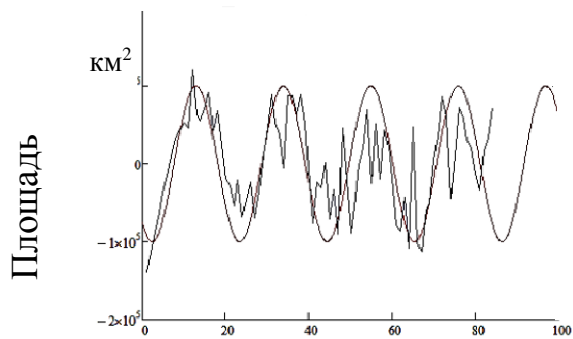


Рисунок 18. Вероятность (%) насыщенного состояния водяного пара с учетом всех наблюдавшихся в 2008 году флуктуациях температуры и влажности.

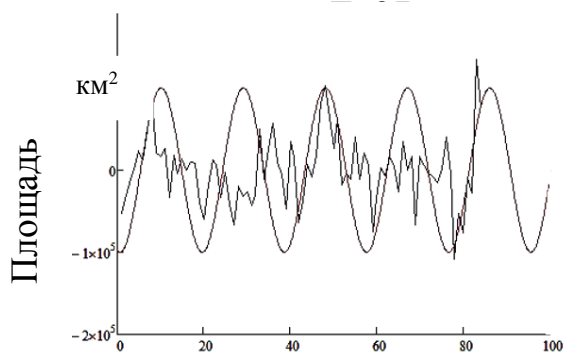
В дальнейшем в нашей статье (Солодовник и др., 2013) исследован временной ход остаточных разностей: «наблюдаемая площадь поля минус вычисленное значение». Построенные по этим данным графики (рисунок 18) имеют очевидную периодичность. В этой связи их аппроксимация выполнялась гармоническими функциями. Программа позволяла определить период и амплитуду аппроксимирующей синусоиды по принципу минимальности дисперсии остаточных отклонений. Исключение составляет сезоны 2009 и 2010, где графики временного хода имеют несколько далекий вид от гармонической функции. На рисунке 19 приведены результаты такой обработки для 2007-2012 гг.



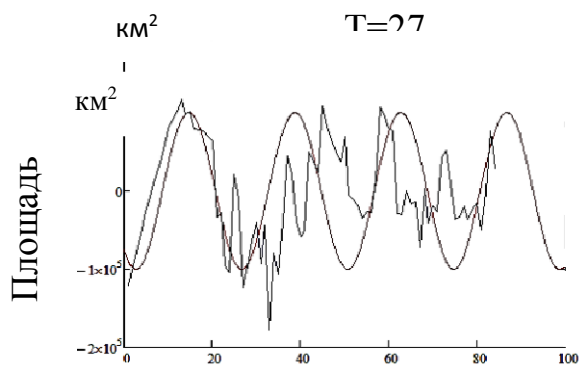
Дни сезона С.О. 2007 г.



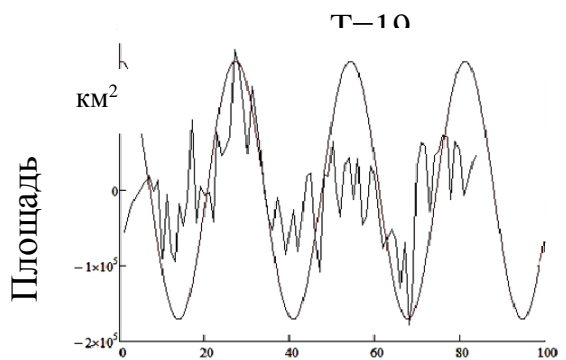
Дни сезона С.О. 2008 г.



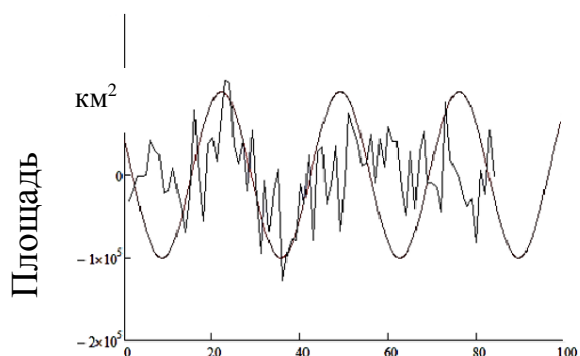
Дни сезона С.О. 2009 г.



Дни сезона С.О. 2010 г.



Дни сезона С.О. 2011 г.



Дни сезона С.О. 2012 г.

T=27

T=27

Рисунок 19. Результаты аппроксимации остаточных отклонений площади поля С.О. гармоническими функциями.

Получено, что типичные периоды гармонических функций заключены в пределах от 18 до 27 суток. Большие периоды близки к периодам движения Луны вокруг Земли (звездному, драконическому и аномалистическому месяцу) и к каррингтоновскому периоду вращения Солнца (27 суток). Меньшие периоды интерпретировать труднее, но и для них можно найти разумное объяснение. Периоды в диапазоне от единиц до 16 суток показывают и изменения давления в земной атмосфере (Швед, 1997). 27-Дневный период в появлении мезосферных облаков найден также в более ранней работе (Robert et al., 2010) и более поздней (Thomas et al., 2015).

Выводы по главе 2:

1. Впервые в мировой геофизике на основе спутниковых данных создана методика вычислений вариаций размеров площади, занятой мезосферной облачностью, на планетарном масштабе.

2. На основе фотоизображений космического мониторинга, полученных спутником AIM, рассчитан массив данных о суммарной площади полей серебристых облаков в Северном полушарии для шести летних сезонов (2007 - 2012 гг.).

3. Анализ полученных временных рядов позволил обнаружить повторяющуюся из сезона в сезон общую временную закономерность изменения площади глобального поля серебристых облаков Северного полушария. Показано, что эта закономерность достаточно хорошо описывается параболической функцией.

4. Выявлены как общая сезонная закономерность, связанная с возникновением, развитием и деградацией глобального поля серебристых облаков, так и отклонения от нее, а именно, 19 – 27 суточные осцилляции площади, амплитуда и период которых отличается от сезона к сезону.

Глава 3. Стационарные долготные неоднородности в площадях мезосферных облаков по данным CIPS AIM (июнь – июль)

Один из наиболее сложных вопросов в исследовании мезосферных серебристых облаков связан с изучением широтно-долготной структуры глобального поля облачности этого типа. К его решению в эпоху до спутниковых наблюдений можно было подойти только путем проведения координированных наземных наблюдений С.О. из множества наземных пунктов, что было реализовано впервые в программе Международного геофизического года (1957–1958 гг.). В дальнейшем такие наблюдения С.О. были продолжены в течение еще нескольких сезонов. Результаты этих работ позволили сделать предварительный вывод о возможной долготной неоднородности облачного поля, что наиболее полно описано Бессоновой (1963) в рамках долготного сектора СССР.

Впрочем, с учетом значительной неоднородности в распределении пунктов наблюдений, сделанное автором заключение нельзя было считать вполне достоверным. Кроме того, основная часть широтных поясов $55\text{--}60^\circ \text{ N}$ и $55\text{--}60^\circ \text{ S}$, на которых проводятся наземные наблюдения С.О., приходится на океаны и вообще не охвачена наблюдениями. Значительный успех в изучении этого вопроса может быть достигнут только на основе обработки данных наблюдений за распределением облачных полей, охватывающих большую часть той пространственной области, где обычно отмечается появление С.О. Кроме того, необходимо, чтобы такие данные включали результаты, полученные в течение нескольких сезонов наблюдений. Только при соблюдении этих условий можно получить достоверные результаты о долготном распределении полей мезосферных серебристых облаков.

Выводы о долготной структуре С.О. на новом качественном уровне можно получить в наши дни благодаря наличию доступных результатов

мониторинга мезосферной облачности, проводимого с помощью спутника AIM. Эти данные привлекательны не только достаточно широким охватом околополярной области, где и формируются С.О., но и своей однородностью по долготам. Таким образом, появляется возможность решения интересной и важной проблемы – выявление отклонений глобального поля мезосферных серебристых облаков Северного полушария от зонально-симметричного (долготно-однородного).

Для анализа были взяты ежесуточные изображения поля мезосферных облаков, которые синтезировались (LASP, 2014) на основе данных наблюдений, проводимых аппаратом CIPS со спутника AIM в летние сезоны 2007–2012 гг., в одно и то же местное солнечное время (22–24 ч) в интервале широт 50–80° N равномерно по всем долготам. Анализ таких изображений позволяет определить глобальные и региональные характеристики площади, занятой облачностью. Как показано в статье (Кудабаева и Солодовник, 2015), эти данные позволяют получить, в частности, внутри- и меж-сезонные вариации площади глобального поля серебристых облаков.

В настоящей главе продемонстрировано существование стационарных (повторяющихся из года в год) долготных вариаций развития мезосферной облачности (Кудабаева, 2015). При этом данные о площадях С.О. усредняются за июнь и июль, что соответствует максимальному развитию мезосферных облаков. Месяцы первого появления и исчезновения С.О., которые приходятся в Северном полушарии на май и август, характеризуются малыми площадями облачных образований и поэтому представляются менее информативными в рамках данного исследования (сезонный ход площадей С.О. исследован в работах (Солодовник и др., 2014; Кудабаева и Солодовник, 2015) и описан в главе 2). Для получения представления о характере долготного распределения мезосферной облачности приполярная область Северного полушария была

разделена на 8 долготных секторов по 45° , начиная от меридиана Гринвича, к востоку. Схема разбиения приведена на рисунке 20.

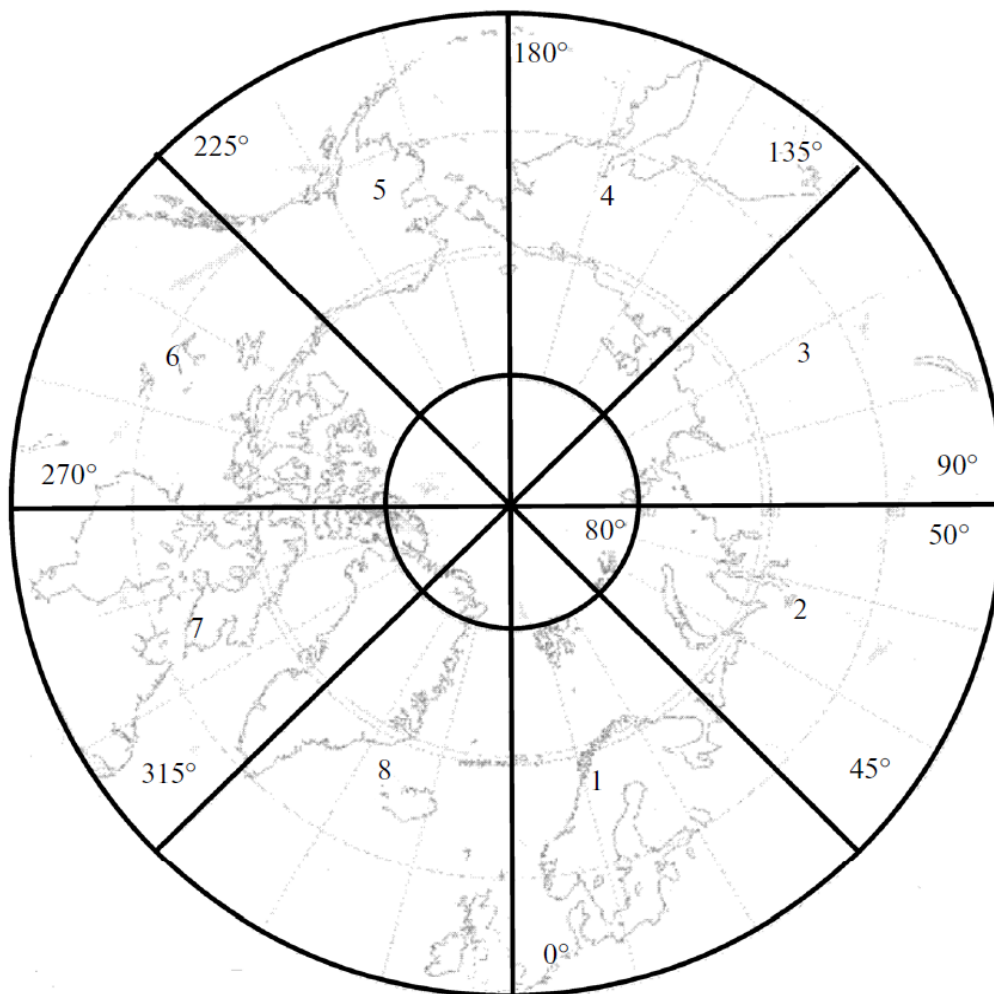


Рисунок 20. Условное разделение Северного полушария на долготные секторы.

В пределах каждого сектора с использованием модифицированной версии программы, описанной в статье (Кудабаева и Солодовник, 2015), рассчитывались значения площади, занятой полем серебристых облаков Северного полушария. Результаты расчетов среднесуточных показателей, осредненные за июнь и июль, включающие шесть сезонов (2007–2012 гг.), приведены в таблице 5.

Таблица 5. Межгодовые и долготные вариации площади С.О.

Долготы	№ сек.	Кол-во пикселей ($\times 10^6$), 2007 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^6$), 2008 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^6$), 2009 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^6$), 2010 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^6$), 2011 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^6$), 2012 г.
0° – 45°	1	2,78	2,43	2,08	1,99	2,17	2,19
45° – 90°	2	2,68	2,23	2,21	1,95	2,21	1,93
90° – 135°	3	2,49	2,03	1,84	1,73	1,66	1,64
135° – 180°	4	3,12	2,64	2,54	2,31	2,45	2,15
180° – 225°	5	3,02	2,55	2,44	2,14	2,41	2,04
225° – 270°	6	2,83	2,11	2,19	1,79	2,06	1,73
270° – 315°	7	2,79	2,19	1,99	1,90	2,17	1,75
315° – 360°	8	2,83	2,33	2,21	2,08	2,23	2,05
Среднее		2,82	2,31	2,08	1,99	2,17	1,94

Здесь в каждой ячейке показаны среднесуточные площади облачности по каждому сектору в количестве пикселей. Кроме того, приводится их среднее значение по всем 8-ми секторам. 1 пиксель соответствует площади приблизительно 25 км². Данные, представленные в табл. 5, показывают и межгодовые, и долготные вариации площади.

3.1. Анализ вариаций площади облачного поля по долготным секторам в интервале широт 50 – 80° N

Для оценки долготной неоднородности полей С.О. рассчитаны отношения площади облачного поля в данном долготном секторе к средней по всем секторам площади мезосферной облачности (табл. 6).

Таблица 6. Долготные вариации средней за июнь и июль данного года площади облачного поля в восьми долготных секторах.

Июнь+Июль							\bar{x}	S_x	Δx	ε (%)
№ сект/ год	2007	2008	2009	2010	2011	2012				
1	0,987	1,049	0,953	1,004	0,999	1,134	1,021	0,026	0,091	9
2	0,951	0,964	1,009	0,982	1,017	0,995	0,987	0,011	0,038	4
3	0,886	0,879	0,840	0,873	0,763	0,848	0,848	0,019	0,066	7
4	1,106	1,140	1,160	1,163	1,129	1,109	1,135	0,010	0,035	3
5	1,071	1,103	1,116	1,078	1,112	1,054	1,089	0,010	0,035	3
6	1,004	0,912	1,004	0,904	0,951	0,895	0,945	0,020	0,070	7
7	0,993	0,945	0,910	0,957	1,001	0,905	0,952	0,017	0,059	6
8	1,003	1,008	1,008	1,040	1,028	1,061	1,025	0,009	0,031	3

Примечание:

Колонки, обозначенные номером года, дают отношение средней площади поля С.О. в данном секторе к среднему по всем секторам

\bar{x} – среднее значение в секторе за все года

S_x – среднеквадратичная ошибка среднего арифметического \bar{x}

Δx – погрешность среднего для вероятности $P=0,99$

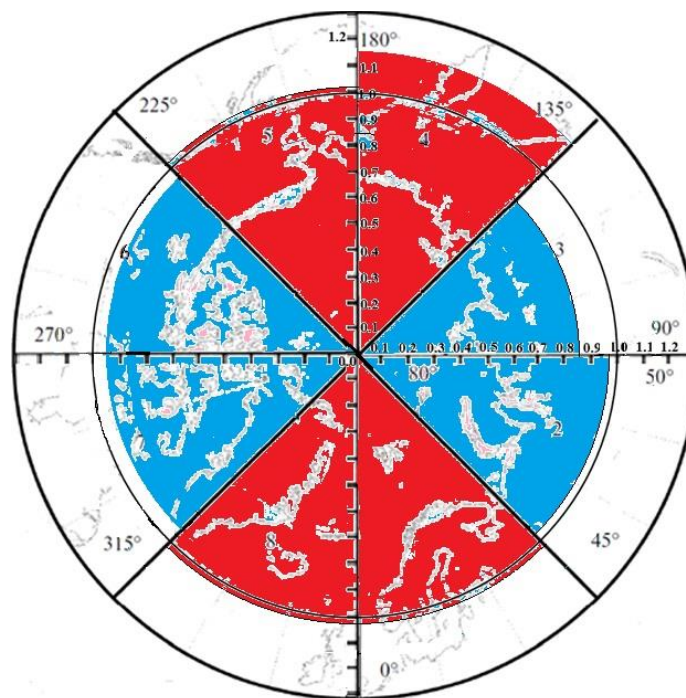
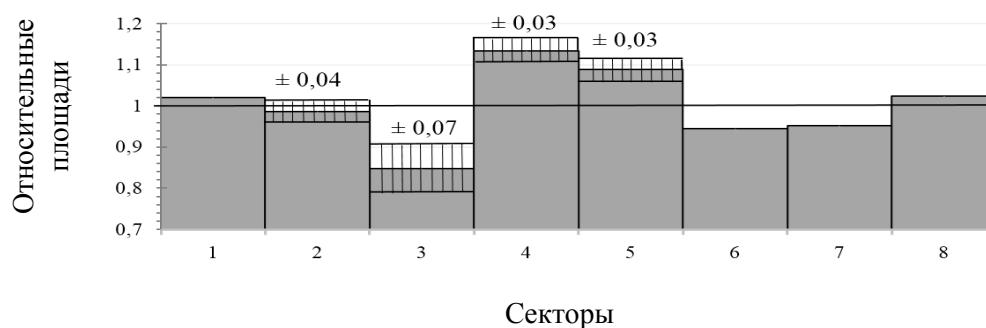
ε – относительная погрешность результата измерений

Расчет относительной погрешности результата измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\%,$$

где доверительный интервал (погрешность измерения) ($\Delta x = S_x \cdot t$), при $t = 3,5$ ($P=0,99$).

В 2012 г. площадь С.О. во втором секторе близка к среднему значению, в третьем – заметно ниже, а первом и четвертом – заметно выше среднего. То же самое происходит и во все остальные исследованные годы. Наглядно эти результаты представлены на рисунке 21, на котором хорошо заметно наличие долготных секторов с повышенной и пониженной площадями серебристых облаков.



б)

Рисунок 21. Графическое представление отношения площади облачного поля для каждого из восьми долготных секторов к среднему по всем секторам.

а) Для четырех секторов штриховкой показаны доверительные интервалы среднего для вероятности 0.99. Горизонтальная прямая показывает

среднезональное значение относительной площади. б) Площадь, занятая мезосферной облачностью, над полярной областью Северного полушария.

Красным цветом показаны сектора, в которых площадь мезосферной облачности превосходит среднезональный уровень, синим – ниже среднезонального уровня.

Устойчиво меньшие площади характерны для С.О. в секторах №№ 3 и 6 (Восточная Сибирь и Канада, соответственно). В то же время абсолютный максимум достигается в секторе № 4 (Дальний Восток – Берингово море). Близок к максимуму показатель площади для сектора № 5 (Аляска). Обнаруженные стационарные отклонения площадей С.О. от среднезонального значения значимы для секторов № 3 и № 5 с вероятностью не менее 0.99, а для сектора № 4 – не менее 0.999.

Обнаруженная долготная асимметрия в распределении глобального поля мезосферных серебристых облаков нуждается в интерпретации. По-видимому, наблюдаемые долготные неоднородности представляют собой стационарные планетарные волны, впервые описанные в работе (Barnett and Corney, 1985) на высотах до барического уровня 0.01 гПа и относящиеся к классу волн Россби. Одновременно с настоящей работой были получены убедительные свидетельства существования в меридиональном ветре летней верхней мезосферы стационарных планетарных волн на широтах 51–66° N (Stray et al., 2015). По результатам настоящей работы зона существования таких стационарных планетарных волн в летней верхней мезосфере может быть расширена, по крайней мере, до 75° N.

3.2. Долготные вариации площади полей С.О. в более узких широтных диапазонах

Выводы, полученные в предыдущем разделе, уточнены путем проведения более детального исследования по той же методике не для всего поля мезосферной облачности Северного полушария, а для выделенных широтных зон. С учетом широтных ограничений, присутствующих в исходных данных, весь широтный диапазон разделяется на три кольцевые широтные области: первая от 80 до 70 градусов с.ш. (полярная); вторая от 70 до 60 градусов (субполярная) и третья от 60 до 50 градусов (умеренная). Разумеется, площади таких зон будут различными, но наше исследование касается относительных различий площади отдельных долготных сегментов таких зон. На рисунке 22 показана структура их расположения в проекции на полярную область Земли.

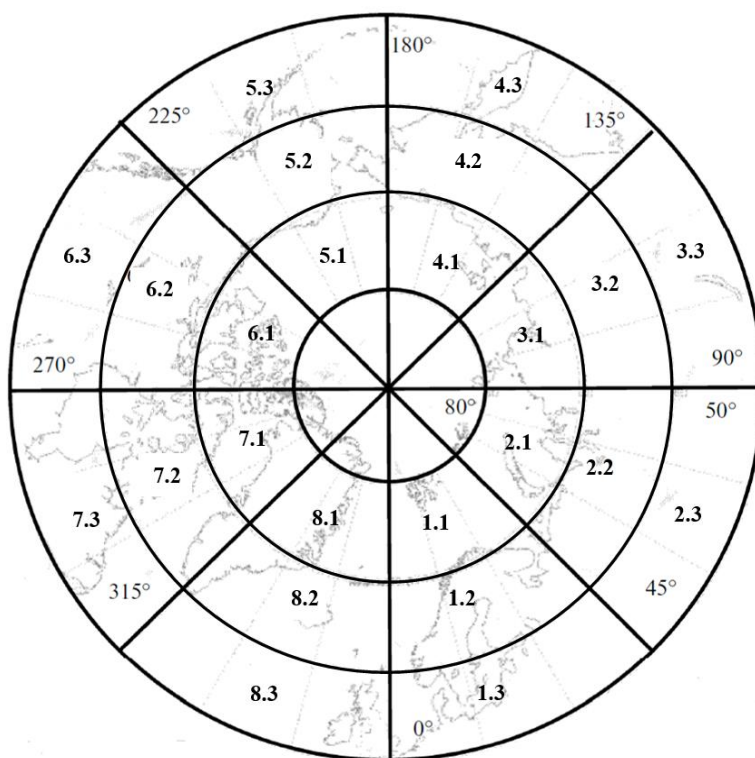


Рисунок. 22. Условное разделение северного полушария на долготные сегменты.

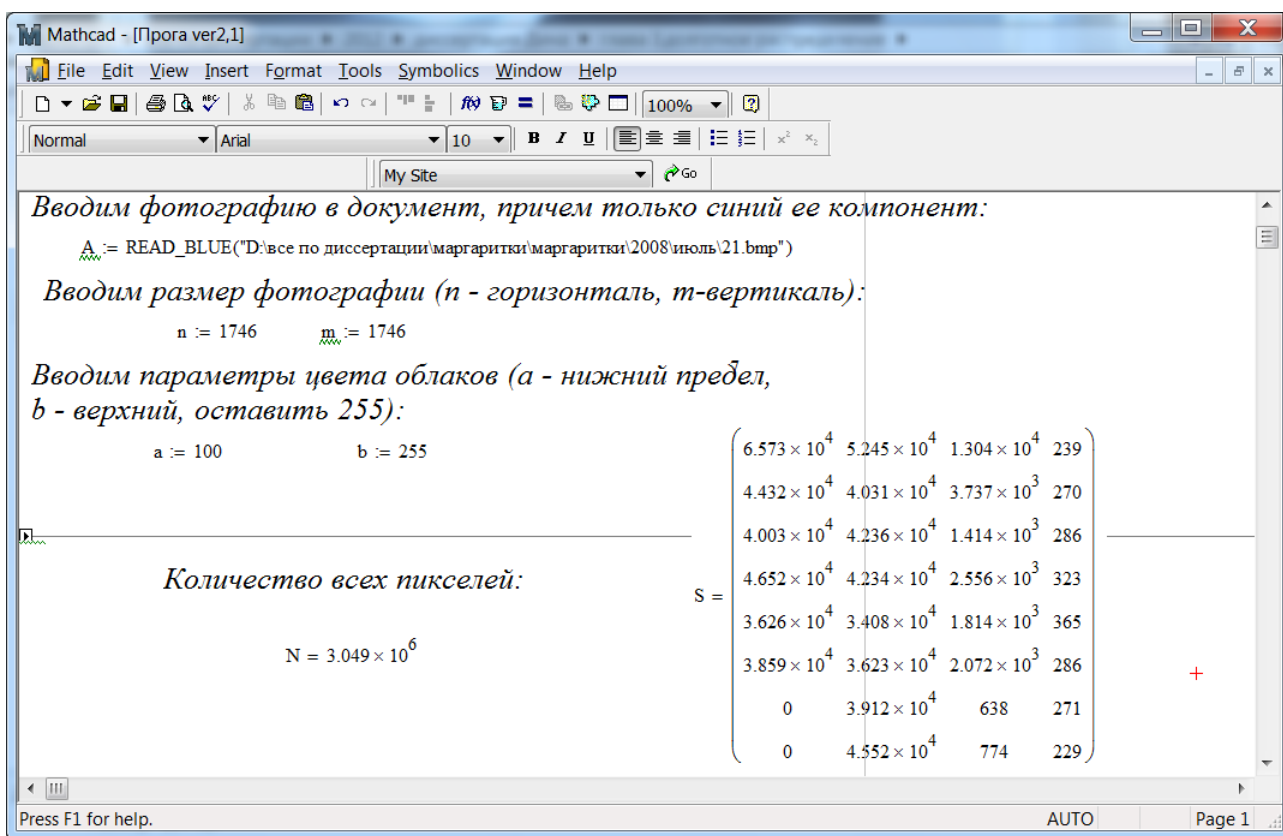


Рисунок 23. Программа разбиения снимка АИМ на сегменты

Имея заданную структуру разбиения изображений, следуя детально изложенному подходу расчёта площади, занятой С.О. были рассчитаны данные о площадях, занятых облачностью в каждой из выделенных зон (таблицы 7-8).

Таблица 7. Межгодовые и широтные вариации площади С.О. по данным, усредненным за июнь и июль.

Полярная кольцевая зона							
№ сегм./ секто ра.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2007 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2008 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2009 г.	Кол-во пикселе й ($\times 10^4$), 2010 г.	Кол-во пикселе й ($\times 10^4$), 2011 г.	Кол-во пикселе й ($\times 10^4$), 2012 г.	среднее
1.1	173,984	206,974	175,443	179,285	201,822	158,966	182,746

2.1	165,699	185,572	194,362	168,684	200,251	185,337	183,318
3.1	154,961	164,121	170,346	157,727	152,842	184,488	164,081
4.1	195,547	224,076	209,889	203,369	213,804	162,804	201,582
5.1	190,284	217,416	206,314	192,902	221,926	173,218	200,343
6.1	169,253	185,029	191,465	162,775	185,475	194,107	181,351
7.1	166,326	182,687	171,157	169,962	186,811	190,839	177,963
8.1	180,413	207,888	190,213	184,469	202,136	165,897	188,503
среднее							184,986
Субполярная кольцевая зона							
№ сегм./сектора.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2007 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2008 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2009 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2010 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2011 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2012 г.	среднее
1.2	17,992	19,565	19,632	18,552	19,536	18,855	19,022
2.2	16,320	20,040	20,742	17,352	18,289	17,119	18,310
3.2	16,127	19,228	19,141	16,424	17,705	18,609	17,872
4.2	22,795	29,983	24,623	26,016	24,668	25,227	25,552
5.2	17,375	22,694	21,055	19,643	22,872	18,487	20,355
6.2	27,807	25,504	28,756	25,472	26,299	20,618	25,743
7.2	28,024	29,467	24,159	29,770	25,147	26,811	27,230
8.2	26,466	26,675	26,638	25,534	26,599	24,869	26,130
среднее							22,527
Кольцевая зона умеренных широт							
№ сегм./сектора.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2007 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2008 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2009 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2010 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2011 г.	Кол-во пикселей ($\times 10^4$), 2012 г.	среднее
1.3	1,717	1,737	1,861	1,749	1,816	1,703	1,764

2.3	2,195	2,201	2,620	2,428	2,408	2,382	2,372
3.3	1,374	1,409	1,408	1,402	1,430	1,409	1,405
4.3	1,632	1,792	2,189	1,669	2,092	2,030	1,901
5.3	1,626	1,697	1,782	1,700	1,718	1,743	1,711
6.3	1,394	1,417	1,469	1,421	1,644	1,826	1,529
7.3	1,939	1,974	2,035	1,998	2,020	2,014	1,997
8.3	1,717	1,728	1,758	1,762	1,786	1,741	1,749
среднее							1,803

Таблица 8. Долготные вариации площади облачного поля. То же, что в табл. 7, но числа из таблицы 7 для каждого года нормированы на среднее по всем секторам для данной широтной зоны этого года.

Июнь+Июль							\bar{x}	S_x	Δx	ε (%)
№ сегмента	2007	2008	2009	2010	2011	2012				
Полярная кольцевая зона										
1.1	0,941	1,119	1,119	0,948	0,969	1,091	0,988	0,041	0,111	11
2.1	0,896	1,003	1,003	1,051	0,912	1,083	0,991	0,031	0,084	8
3.1	0,838	0,887	0,887	0,921	0,853	0,826	0,887	0,019	0,051	5
4.1	1,057	1,211	1,211	1,135	1,099	1,156	1,090	0,043	0,116	10
5.1	1,029	1,175	1,175	1,115	1,043	1,200	1,083	0,037	0,100	9
6.1	0,915	1,000	1,000	1,035	0,880	1,003	0,980	0,028	0,076	7
7.1	0,899	0,988	0,988	0,925	0,919	1,010	0,962	0,023	0,062	6
8.1	0,975	1,124	1,124	1,028	0,997	1,093	1,019	0,033	0,089	8
Субполярная кольцевая зона										
1.2	0,799	0,869	0,872	0,824	0,867	0,837	0,844	0,014	0,038	5

2.2	0,724	0,890	0,921	0,770	0,812	0,760	0,813	0,039	0,105	12
3.2	0,716	0,854	0,850	0,729	0,786	0,826	0,793	0,030	0,081	10
4.2	1,012	1,331	1,093	1,155	1,095	1,120	1,134	0,039	0,105	9
5.2	0,771	1,007	0,935	0,872	1,015	0,821	0,904	0,045	0,122	14
6.2	1,234	1,132	1,277	1,131	1,167	0,915	1,143	0,045	0,122	10
7.2	1,244	1,308	1,072	1,322	1,116	1,190	1,209	0,034	0,092	7
8.2	1,175	1,184	1,183	1,133	1,181	1,104	1,160	0,012	0,032	2
Кольцевая зона умеренных широт										
1.3	0,952	0,963	0,963	1,032	0,970	1,007	0,978	0,014	0,038	3
2.3	1,217	1,220	1,220	1,453	1,346	1,335	1,315	0,027	0,073	5
3.3	0,762	0,782	0,782	0,781	0,777	0,793	0,779	0,005	0,014	1
4.3	0,905	0,993	0,993	1,214	0,926	1,160	1,054	0,050	0,135	12
5.3	0,902	0,941	0,941	0,988	0,943	0,953	0,949	0,013	0,035	3
6.3	0,773	0,786	0,786	0,814	0,788	0,912	0,848	0,046	0,124	14
7.3	1,075	1,095	1,095	1,129	1,108	1,120	1,107	0,007	0,019	1
8.3	0,952	0,958	0,958	0,975	0,977	0,990	0,970	0,006	0,016	1

Примечание:

\bar{x} – среднее значение в секторе за все года

S_x – среднеквадратичная ошибка среднего арифметического \bar{x}

Δx – погрешность среднего для вероятности $P=0,95$

ε – относительная погрешность результата измерений

Наглядно результаты в таблице 8 представлены на рисунках 24-26.

Полярная кольцевая зона

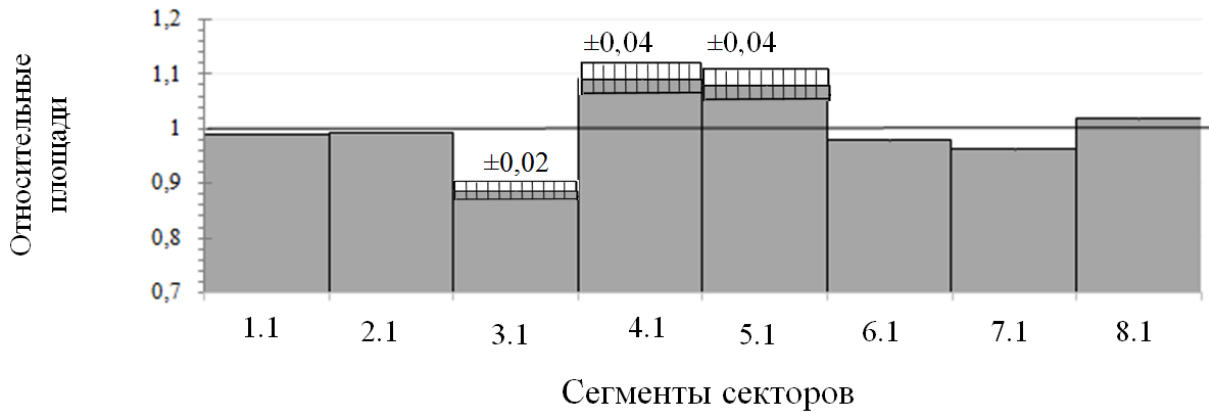


Рисунок 24. Графическое представление отношения площади облачного поля для каждого сегмента полярной кольцевой зоны к среднему по всем сегментам выбранной области. Для трех сегментов секторов штриховкой показаны доверительные интервалы среднего для вероятности 0.99. Горизонтальная прямая показывает среднезональное значение относительной площади.

Субполярная кольцевая зона

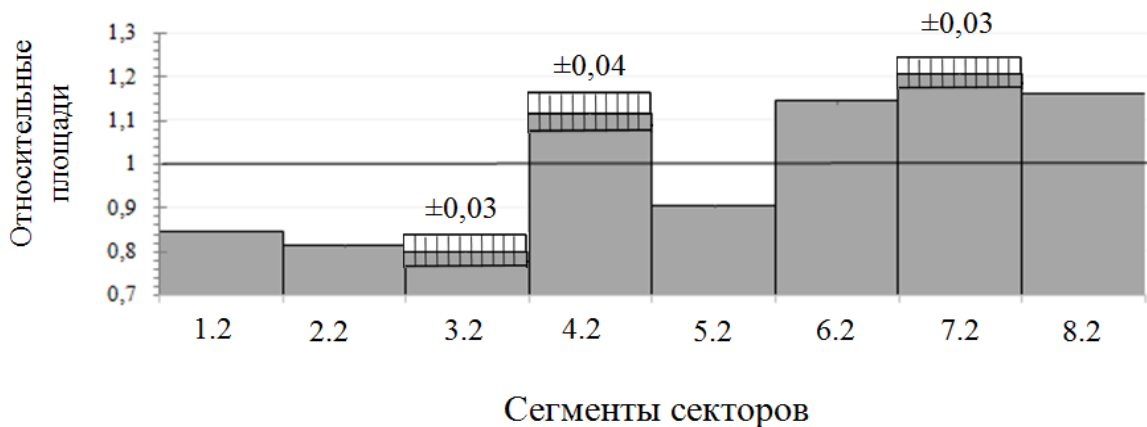


Рисунок 25. Графическое представление отношения площади облачного поля для каждого сегмента субполярной кольцевой зоны к среднему по всем сегментам выбранной области. Для двух сегментов секторов штриховкой показаны доверительные интервалы среднего для вероятности 0.99. Горизонтальная прямая показывает среднезональное значение относительной площади.

Кольцевая зона умеренных широт

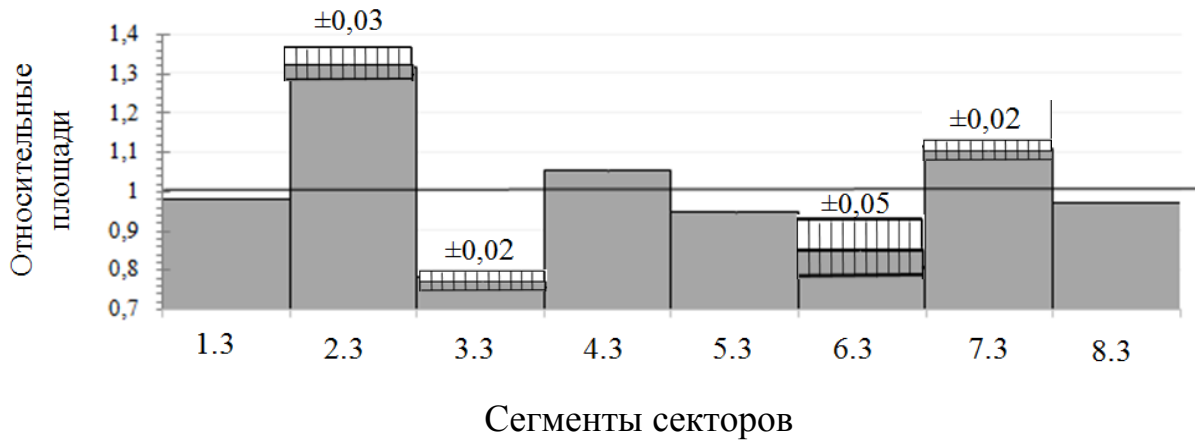
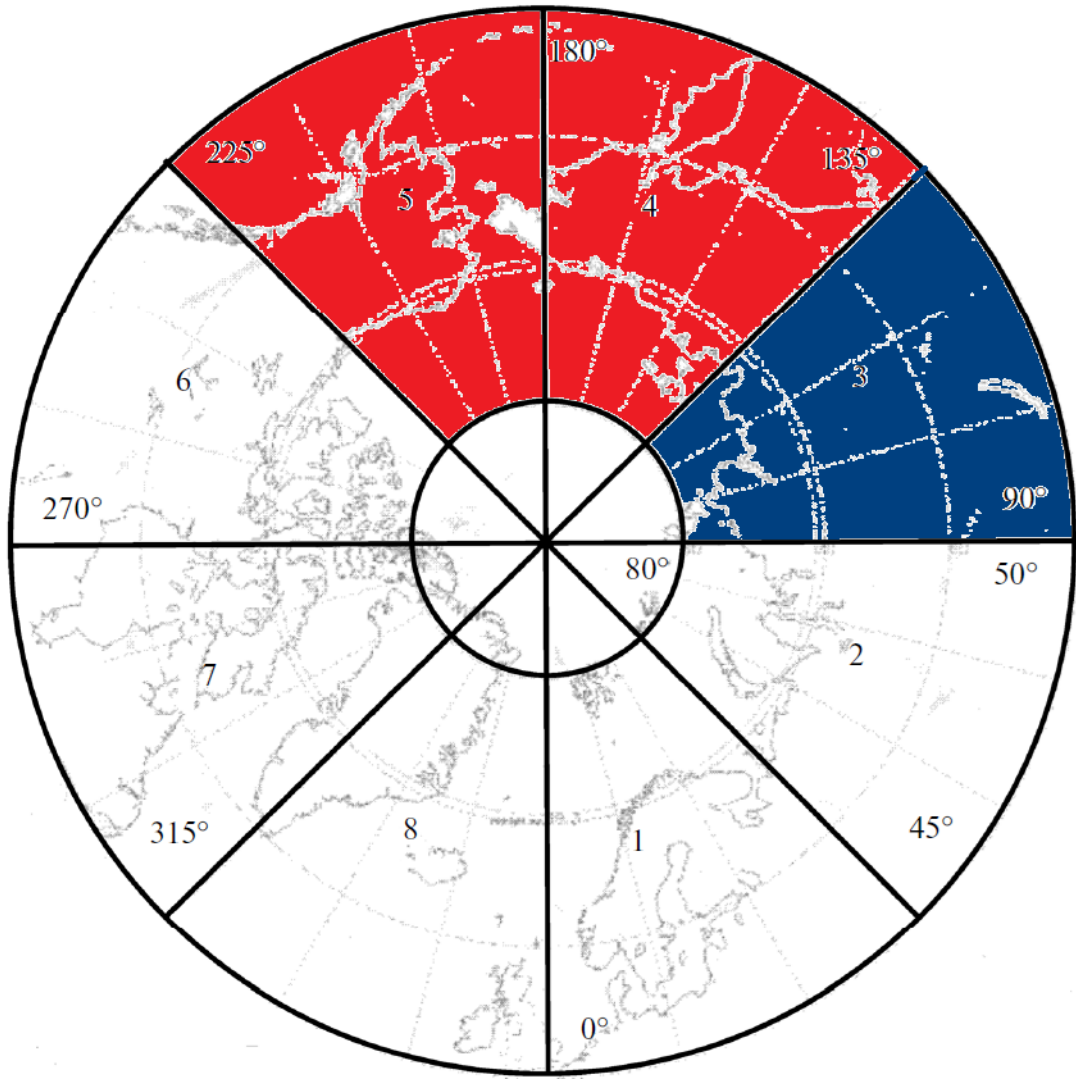
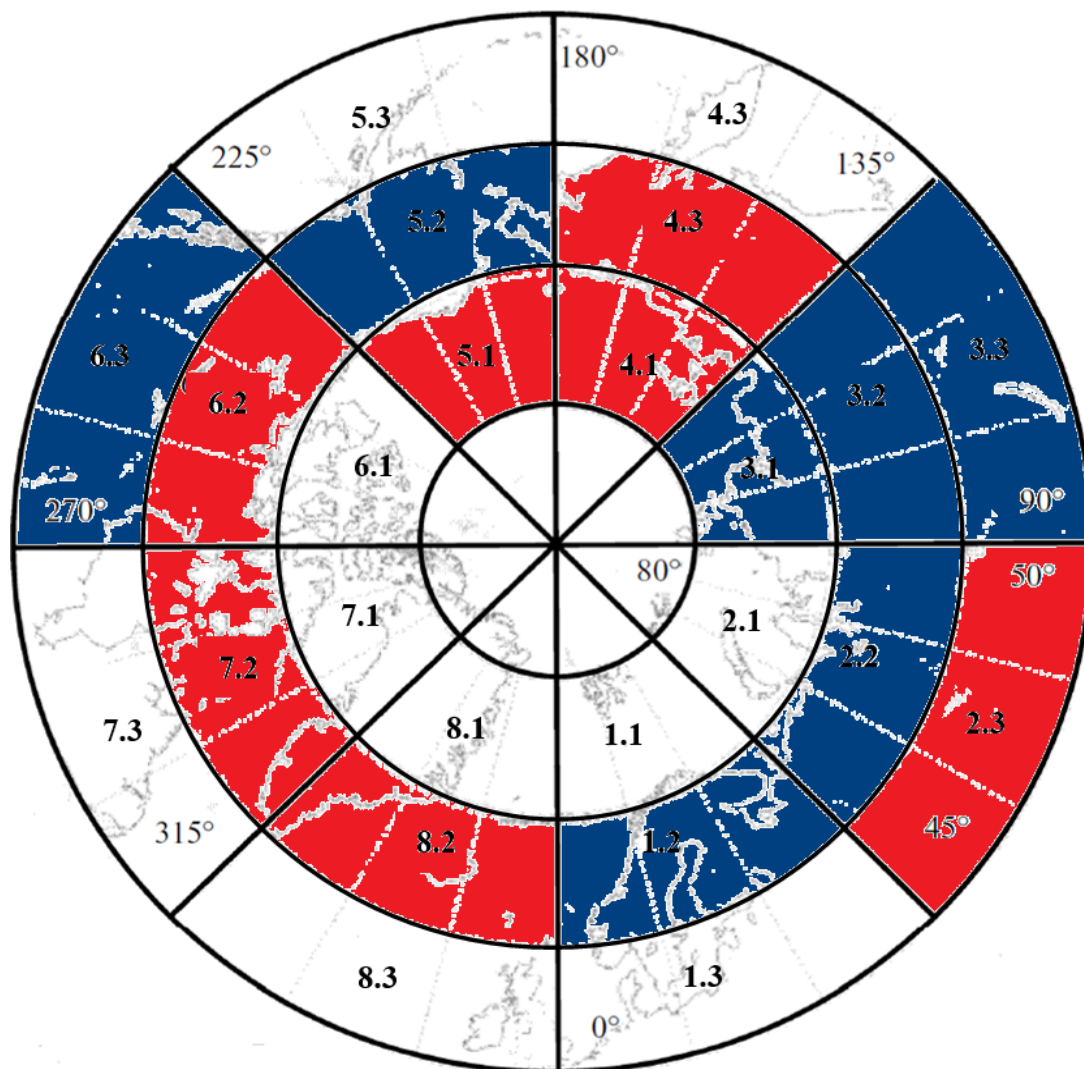


Рисунок 26. Графическое представление отношения площади облачного поля для каждого сегмента кольцевой зоны умеренных широт к среднему по всем сегментам выбранной области. Для трех сегментов секторов штриховкой показаны доверительные интервалы среднего для вероятности 0.99. Горизонтальная прямая показывает среднезональное значение относительной площади.

На основании представленных выше данных возможно выявить широтно-долготные особенности распределения глобального поля серебристых облаков Северного полушария. Они схематически представлены на рисунке 27. Здесь красным цветом выделены области с заметно большей относительно среднего значения площадью поля С.О., а синим, соответственно, области заметно менее интенсивного развития С.О. На рисунках 27 а и б данные приведены для долготных секторов и детально для широтно-долготных сегментов, соответственно.



a)



б)

Рисунок 27. Локализация максимумов и минимумов площади С.О. по данным, усредненным за июнь и июль, а) для долготных секторов; б) для отдельных сегментов секторов. Красным цветом показаны сектора, в которых площадь мезосферной облачности заметно превосходит среднезональный уровень, синим – ниже среднезонального уровня.

Обращает на себя внимание тот факт, что как для долготных секторов в целом площадь облачного поля достигает максимальных значений в области над крайним востоком Азии и крайним западом Северной Америки – область Аляски. Получившиеся результаты нашли хорошее подтверждение в недавно

опубликованной работе (Liu et al., 2016), в которой аналогичный анализ долготных неоднородностей по тем же первичным данным (за 2007 - 2014 гг. вместо 2007 – 2012, используемых в настоящей работе) проведен для альбедо С.О. Liu et al. (2016) выявили стационарные долготные неоднородности для арктической и антарктической летней мезосферной облачности, причем в Южном полушарии получен значительно более сильный эффект. В Северном полушарии наибольшие отклонения от зональной симметрии видны в области широт 70-80° (рис. 4а в (Liu et al., 2016)), что соответствует «полярной» кольцевой зоне настоящей работы (на более южные области анализ (Liu et al., 2016) не распространялся). Как и следовало ожидать из рис. 24 диссертации, повышенное альбедо приходится на области, соответствующие сегментам 4.1 и 5.1 (Тихоокеанская Арктика и Аляска), пониженное – на 3.1. (Сибирская Арктика) Кроме того, повышенное альбедо приходится на сегмент 8.1, а пониженное – на 7.1, что также не противоречит рис. 24 диссертации. Таким образом, Liu et al. (2016) подтверждают результаты по долготной неоднородности С.О. (Кудабаева, 2015) и распространяют их на южное полушарие. Вместе с тем, следует отметить недостаток альбедо как анализируемой переменной, уже отмечавшийся в главе 2: она гораздо более чувствительна к изменению углов рассеяния, чем площадь мезосферной облачности. В условиях длинных полос кадров, показанных на рисунке 5, угол рассеяния может меняться на десятки градусов, и за счет этого изменение индикатрисы рассеяния, соответствующее плохо определенному и изменчивому ансамблю частиц, может достигать десятков процентов. Впрочем, это не должно давать систематической ошибки по долготе, а дает случайную ошибку при приведении альбедо к нормализованным условиям.

Рассматривая рисунок 27б), хорошо заметно смещение максимума площади облачного поля при переходе от полярной к субполярной зоне (сегменты 5.1 – 6.2). Направление такого смещения на юго-восток не

соответствует преобладающему направлению С.О. к югу и западу в полярном мезосферном летнем вихре. Совершенно по-особенному выглядит распределение площади поля С.О. для умеренной широтной зоны. Здесь появляется резкий максимум в области Урало-Сибирского региона (сегмент 2.3). Заметим, что по соседству с этим сегментом расположены сегменты со сравнительно низкой средней относительной (т.е. нормированной на среднеширотное значение в данном широтном поясе) площадью облачных полей. Однако следует учитывать, что в сегментах 1.2, 2.2 и 3.2, расположенных соответственно к северо-западу, северу и северо-востоку от сегмента 2.3, отношение площади, занятой С.О., ко всей площади сегмента, все равно больше чем в последнем. Таким образом, для объяснения увеличения относительной площади С.О. можно предполагать либо существование некоторого локального механизма генерации серебристых облаков над Урало-Сибирским регионом, либо более благоприятные условия для их переноса с севера. Как уже указывалось в главе 1, преобладающий меридиональный ветер в летней верхней мезосфере на широтах $51-66^{\circ}$ N заметно зависит от долготы (Stray et al., 2015). Тем самым появляется необходимость детального анализа обстоятельств появления серебристых облаков в указанной области. Попытку объяснения наблюдаемой крупномасштабной структуры С.О. над Арктикой без привлечения данных о ветре (Liu et al. 2016) нельзя назвать удачной. В этой статье на рис. 7 (а,с) приведены карты полей температуры и отношения смеси водяного пара над Арктикой, полученные осреднением спутниковых данных MLS/Aura за те же 8 летних сезонов. Оба поля проявляют небольшие отклонения от зональной симметрии, которые не связаны с долготными неоднородностями площади С.О.

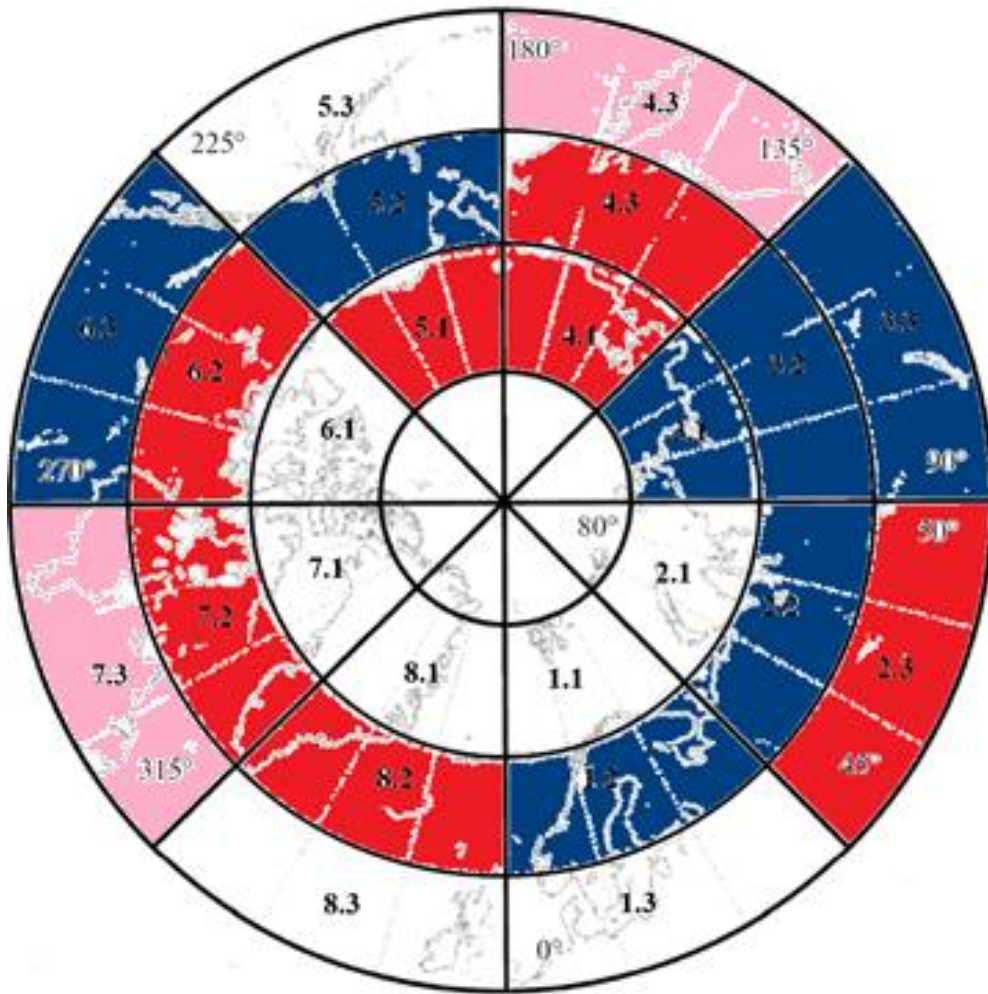


Рисунок 28. То же, что в дополнение к рис. 27 розовым цветом показаны сегменты, в которых площади С.О. превышают среднезональное значение больше чем на 10%.

Логично поставить вопрос, какое соотношение гармоник стационарных планетарных волн проявляется в разных широтных поясах. Применив к полученным данным о площадях облачных сегментов стандартную процедуру одного из вариантов дискретного Фурье-анализа (основанную на методе наименьших квадратов) можно получить данные об амплитудах первой, второй и третьей гармоник (они обозначены ниже как SPW1, SPW2 и SPW3) для каждой широтной зоны. Они представлены в таблице 8.

Таблица 8. Амплитуды первых трех гармоник стационарных планетарных волн в площади С.О. (в процентах от среднего по всем долготным секторам рассматриваемого широтного пояса)

	SPW1	SPW2	SPW3
Полярная зона	3.1	5.5	3.6
Субполярная зона	18.7	11.7	4.1
Зона умеренных широт	5.9	3.5	18.7

В полярной зоне преобладает волновое движение с двумя максимумами и минимумами – длина волны соответствует 180 градусам, а вдоль параллели укладываются две полные длины волны. В субполярной зоне скорее присутствует вращающийся вместе с Землей вихрь с одним максимумом и минимумом, что видно по резкому отличию амплитуд первой и остальных гармоник в таблице 8, так на рисунке 28.

В умеренной зоне преобладающая длина волны уменьшается по крайней мере до 120 градусов (меньшие длины волн на выбранной сетке не удастся проанализировать, поскольку уже 4-я гармоника соответствует периоду Найквиста), при этом вдоль параллели укладываются три полных волны с соответствующим количеством минимумов и максимумов. Наиболее значимый максимум приходится на сегмент, находящийся над Урало-сибирским регионом. В этом широтном поясе различие амплитуд гармоник очень большое (отличаются более чем в 3 раза).

Таким образом, проведенное исследование показывает, что заметные стационарные волны систематически присутствуют во всех трех широтных поясах от 50 до 80° N, и что длинноволновая часть спектра этих волн существенно зависит от широты.

Выводы по главе 3:

1. Обнаружены долготные особенности в распределении глобального поля С.О., которые имеют в период максимального развития мезосферных облаков (июнь-июль) устойчиво повторяющийся характер фазы стационарных волн. Показано, что наибольшие относительные превышения площади мезосферной облачности обнаруживаются на широтах $50-60^{\circ}$ N в Урало-Западносибирском регионе.

2. Выявленные долготные особенности в площадях мезосферной облачности описаны как стационарные планетарные волны. Они являются первым в мировой геофизике надежным свидетельством существования заметных по амплитуде стационарных планетарных волн в летней полярной верхней мезосфере.

3. Показано, что заметные стационарные волны систематически присутствуют во всех трех широтных поясах от 50 до 80° N, и что длинноволновая часть спектра этих волн существенно зависит от широты.

Глава 4. Возможность формирования серебристых облаков тропосферными метеорологическими объектами при посредничестве атмосферных волн

4.1. Изучение связи между тропосферными метеорологическими объектами и серебристыми облаками. Состояние вопроса.

Еще в середине XX века Н.И.Гришин (1958) выдвинул гипотезу существования связи между С.О. и метеорологическими условиями в тропосфере. Согласно этой гипотезе, основанной на многолетнем опыте наблюдений ее автора, появление протяженных полей С.О. каждый раз сопровождалось быстрым наступлением приземного антициклона в сторону района, над которым формировались С.О. Гипотеза Гришина иллюстрировалась многочисленными примерами (Гришин, 1958, 1961, Броштэн и Гришин, 1970), однако никогда не сообщалось о попытках ее вероятностно-статистической проверки. В качестве вероятного посредника указанной тропосферно-мезосферной связи Гришин в статье (1961) предложил атмосферную гравитационную волну, возникающую при горизонтальном продвижении области высокого давления и передающую возмущение, необходимое для образования С.О., в верхнюю мезосферу.

Предположение о волновом посреднике дало новый импульс гипотезе Гришина. В серебристых облаках, как правило, наблюдаются волновые структуры, образованные атмосферными гравитационными и гравитационно-сдвиговыми волнами. Часть этих волн, например, волны Кельвина-Гельмгольца (Dalín et al., 2010), рождаются на месте, а часть приходит из других областей атмосферы. Атмосферные волны способствуют визуализации С.О., поскольку благодаря волновым колебаниям яркость гребней становится часто заметно выше яркости среднего состояния облака, невозмущенного волной, которая может быть даже ниже пороговой яркости видимости. Кроме того, для волн с

периодами, превышающими характерное время конденсации ледяных частиц, естественно ожидать образование облачных частиц непосредственно в температурных ложбинах с последующей их сублимацией при выходе из температурных ложбин, подобно тому, как это часто происходит в нижней тропосфере с подветренной стороны горных вершин. Таким образом, в этих двух ситуациях атмосферные гидродинамические волны могут либо создавать С.О., либо образовывать в неярких облаках более яркие наблюдаемые структуры.

В последующие годы гипотеза Гришина получила дальнейшее развитие как в плане накопления эмпирического материала по анализу метеорологических ситуаций во время появлений/ непоявлений С.О. (в том числе в работах автора диссертации (Солодовник А., Кудабаяева Д., 2009, 2010, 2011, 2012)), так и в плане теоретической проработки действующих механизмов.

Заметной вехой в развитии гипотезы Гришина стала работа (Hines, 1968). Ее автор проанализировал одно хорошо задокументированное наземное наблюдение гравитационно-волновых структур в серебристых облаках, видимых над северной Норвегией и поставил вопрос о возможном тропосферном источнике этих волн. С помощью весьма грубой модели, не учитывавшей вертикальную структуру температурно-ветровой стратификации, Хайнс дал оценку азимута, вертикального наклона траектории и времени распространения волнового пакета. Последнее составило ~ 17 часов, а горизонтальная длина траектории ~ 770 км. В качестве возможного источника Хайнс указал на фронт окклюзии, проходивший в нужное время через Шотландию, однако он сам не настаивал на этом предположении, поскольку в то время никаких более точных расчетов распространения волны не было и не могло быть сделано в отсутствие реалистических вертикальных профилей температуры и скорости ветра.

В последние десятилетия существенно вырос уровень знаний об атмосферных гидродинамических, в частности, гравитационных волнах, их генерации тропосферными источниками и распространении в высокие слои атмосферы. Статистические исследования параметров структуры С.О. показали, что полярные мезосферные облака содержат широкий спектр гравитационных волн с длинами в диапазоне от не менее 15 до 400 км (Chandran et al., 2009; Taylor et al., 2011). Эти гравитационные волны обладают сильной анизотропией в направлении распространения, то есть большинство волн имели направление в сторону северо-северо-востока. (Pautet et al., 2011). Chandran и др. [2010] показали, что частота появления С.О. не связана с волновыми структурами в них, но существует их отчетливая корреляция температурными возмущениями в широтах 70-80°

Анализ данных дистанционных измерений температуры области мезопаузы продемонстрировал (Шефов и др., 1983), что гравитационные волны тропосферных источников, связанных с горами, при определенных условиях могут достигать области мезопаузы и приводить в ней к локальному разогреву воздуха (такие «орографические» волны образуются при подъеме воздушных масс, когда воздушный поток встречает на пути горы или иные возвышенности). Сходную ситуацию, ведущую к подъему воздуха, можно ожидать и при взаимодействии движущихся воздушных масс, имеющих разные температуры и плотности. Было выяснено, что и горизонтальные градиенты скорости ветра, сопровождающие атмосферные фронты и вихри синоптического масштаба, являются источником гравитационных волн; создана математическая модель их генерации (Medvedev and Gavrilov, 1995). Появились численные модели распространения атмосферных гравитационных волн с учетом диссипации и произвольных профилей температуры и скорости ветра (напр., Погорельцев и Перцев, 1995). Наконец, существенно возрос объем

данных измерений, используемых для анализа волновых структур в верхней мезосфере.

Кроме гравитационных волн, оказался вполне реалистичным еще один посредник между тропосферой и мезосферой – планетарные волны. В этом случае и горизонтальное разнесение между тропосферными и мезосферными связанными областями имеет планетарные масштабы. Так, в (Karlsson et al., 2007, 2009) продемонстрирована хорошо выраженная связь между нижней атмосферой зимнего полушария Земли и мезосферной облачностью летнего полушария, осуществляемая за счет планетарных волн, распространяющихся в средней атмосфере из зимнего полушария в летнее. Согласно этим результатам, существует заметная положительная корреляция между стратосферной температурой зимнего и температурой полярной верхней мезосферы летнего полушария с запаздыванием, не превышающим месяца. С другой стороны, стратосферные потепления и похолодания заметно влияют на зональный тропосферный ветер (см., напр., (Kuroda, 2008)). Таким образом, зависимость между тропосферными метеорологическими образованиями зимнего полушария и мезосферной облачностью летнего полушария реальна и в общих чертах объяснима.

Планетарно-волновой и гравитационно-волновой посредники между тропосферой и мезосферой дополняют друг друга, проявляясь на разных масштабах, первый – планетарном, второй – синоптическом и мезомасштабе.

Возвращаясь к гравитационно-волновому механизму, необходимо отметить, что до 2014 г. не было работ, которые проводили бы детальное лучевое трассирование волновых пакетов от гипотетического тропосферного источника до наблюдаемых в С.О. волновых структур с учетом реальной температурно-волновой стратификации, поэтому возможность прохождения волнового пакета от тропосферы до верхней мезосферы, предполагавшаяся в основе гравитационно-волнового механизма, не получила подтверждения на

реальных данных. Этот пробел был исправлен в 2014-15 гг. в двух независимых исследованиях. Первое из них, выполненное американско-германским коллективом (Yue, J., et al., 2014), было основано на анализе нескольких случаев волновой структуры в мезосферной облачности, наблюдаемой из космоса. В рассмотренных в нем случаях размер возмущенной концентрическими волнами области в поле мезосферных облаков, составлял 200-300 км, длина волны изменялась в пределах 30-150 км. Для одного из исследованных случаев проведено обратное лучевое трассирование (ОЛТ) волн, которое указало на тропосферную область мощной конвекции, находящуюся в ~ 1000 км от наблюдаемых концентрических волн. В других четырех случаях ОЛТ не выявило источники наблюдаемых волн. Второе исследование, проведенное с участием автора диссертации и опубликованное в (Dalin et al., 2015), детально описано в следующем разделе.

4.2. Детальная проработка гравитационно-волнового механизма связи между тропосферными структурами и серебристыми облаками для наблюдения 18/19 июля 2013 г.

Рассмотрен уникальный случай распространения внутренних гравитационных волн, наблюдавшихся в не сплошном слое С.О., по данным сети фотокамер в ночь с 18 на 19 июля 2013 года. При анализе использованы изображения с двух синхронизированных автоматических цифровых камер, расположенных в гг. Красногорске, Обнинске (Подмосковье), ведущих непрерывный мониторинг активности С.О. в Северном полушарии (Dalin et al., 2008; Dubietis et al., 2011). Эти волновые структуры проявились в С.О. и сохранялись в них около часа, что существенно отличается от с ранее наблюдавшихся случаев гравитационных волн, распространяющихся через существующие слои серебристых облаков.

На основании проведенного ОЛТ с помощью усовершенствованного варианта численной модели (Погорельцев, Перцев, 1995) распространения атмосферных гравитационных волн и сопоставления его результатов с метеорологическими данными на момент наблюдения и на несколько часов раньше, был определен источник наблюдаемых гравитационных волн тропосферного происхождения, а именно, фронт окклюзии.

Анализ волновых структур. Расстояние 91,25 км между фотокамерами позволяет использовать метод триангуляции для определения высоты С.О. и горизонтальных характеристик изолированных волн. Фотографические данные были проанализированы с использованием нового программного обеспечения, разработанного для обработки изображений С.О. (Dubietis et al., 2011), который основывается на точной калибровке изображений. В результате точность оценки высоты объекта достигает 100–600м при средней высоте С.О. – 83 км (в зависимости от фокусного расстояния объектива и угла места).

На рисунке 29 показаны снимки синхронных наблюдений С.О. с наблюдавшимися элементами волн в них (гребни волн отмечены стрелками А и В) зарегистрированных в Красногорске и Обнинске.



Рисунок 29. Синхронные наблюдения С.О. в Красногорске (выше) и Обнинске (ниже) на 18 июля 2013.



22:26



22:39



23:04





Рисунок 30. Снимки, демонстрирующие развитие изолированной волны в С.О. над Красногорском на 18-19 июля 2013 г.

На рисунке 30 показано развитие основной изолированной и дополнительных волновых структур в С.О. После 22:26 UT возникли мелкомасштабные «гребешки (billows)» с длиной волны 8.5 – 12 км, а в 22:39 сформировались дополнительные гребни (возможно, благодаря генерации второй гармоники). Чуть позже, фазовый фронт продольного гребня начал распадаться.

В течение всего времени наблюдения С.О. угол погружения Солнца под горизонт уменьшался от 12.9 до 9.6°, что, как обычно, сопровождалось усилением сумеречного фона рассеянного солнечного света. Контраст (основной параметр, определяющий видимость С.О.), как и ожидалось, постепенно уменьшался в течение этого периода времени. Таким образом,

анализ установил, что возникновение видимых гребней не было связано с ослаблением фона, кроме того, эти гребни не были перенесены из-за границы кадра. Следовательно, можно утверждать, что зафиксировано рождение видимых облачных структур гравитационной волной.

Основные два гребня имели весьма заметную яркость по сравнению с фоном сумеречного неба. Ширина гребней волн варьировалась в диапазоне от 2,5 до 6 километров. Гребни передвигались с фазовой скоростью около 35-40 м/с относительно окружающего воздуха. С помощью триангуляции была проведена оценка высоты двух гребней волны, а также горизонтальные параметры основной волны (фазовая скорость волны, исследуемый период и длина волны); эти параметры приведены в таблице 9.

Таблица 9. Параметры изолированной гравитационной волны, наблюдавшейся в С.О. 18 июля 2013 г.

Диапазон высот гребней (км)	Диапазон высот ложбин (км)	Длина волны	Азимут (в градусах, от севера)	Фазовая скорость (м/с)	Период (мин)
84,1-85,2	82.7-83.4	65-70	126	28.3	39.2

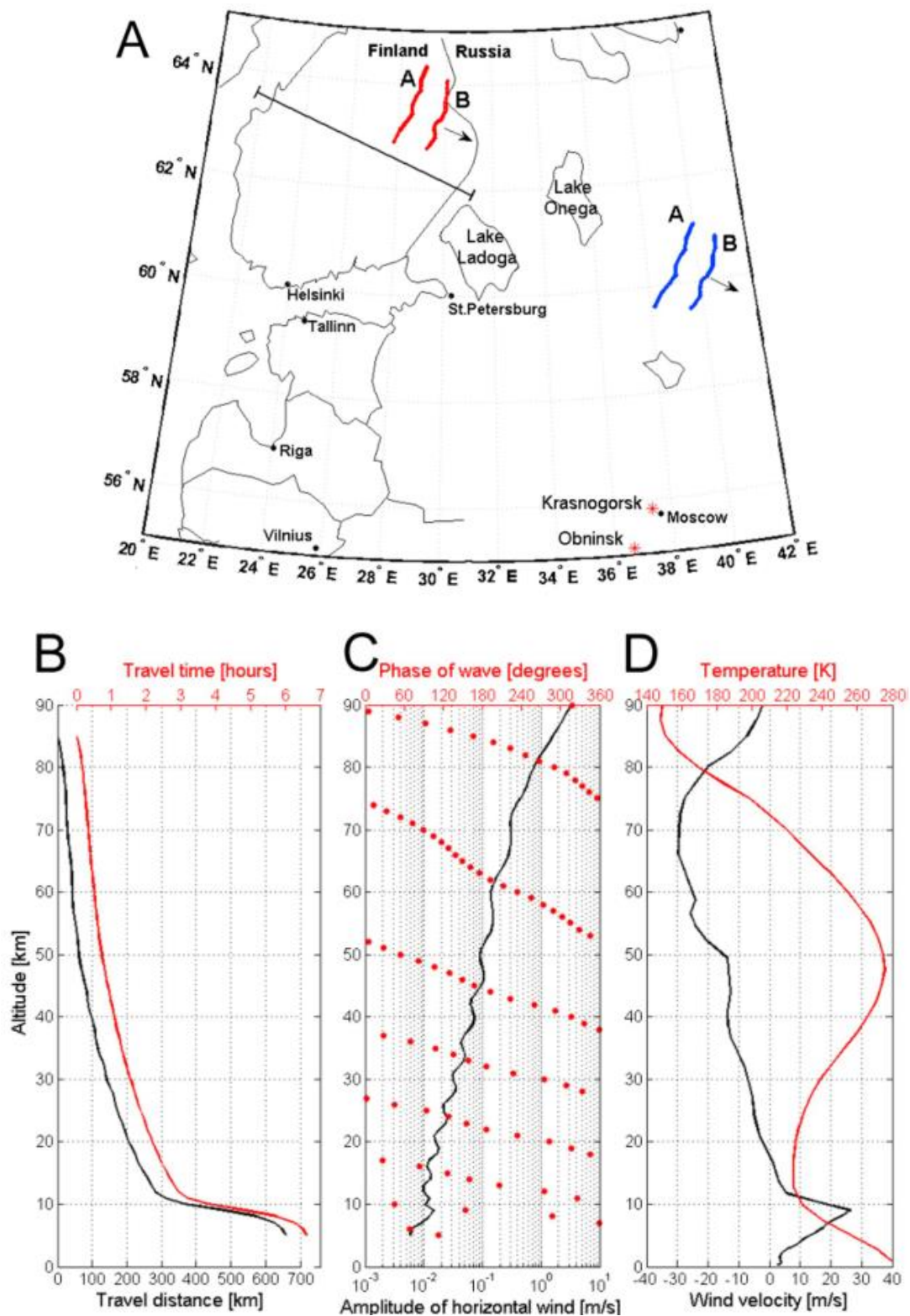


Рисунок. 31. (А) – Проекция двух гребней гравитационной волны на земную поверхность. Синие линии показывают положение гребней в 84,5 км в 22:52 18 июля 2013; красные линии показывают результат их обратного

лучевого трассирования на высоте 5 км (на 6 ч 37 мин раньше). Стрелка указывает направление движения волны. А и В – символы указывают положение гребней волн, показанных на рисунке 30. Неопределенность положения волны вдоль вектора фазовой скорости показано черным отрезком. (В) – расчет траектории волнового пакета и времени распространения вдоль траектории. (С) – расчет вертикальной структуры амплитуды и фазы волны. (D) – фоновые вертикальные профили температуры и проекции скорости ветра на вертикальную плоскость, в которой лежит волновой вектор.

Рисунок 31А иллюстрирует проекцию двух гребней волны, А и В (синие линии) на поверхности Земли. Дополнительные гребни, которые видны на рисунке 31 между А и В гребнями, не показаны на рисунке 31А, так как они имеют значительный наклон по отношению к А и В гребням и большую высоту.

Фоновые условия распространения волны. Кроме знания местонахождения волнового пакета в верхней точке траектории и параметров волны для проведения ОЛТ нужны вертикальные профили фоновых значений температуры и скорости ветра. Данные по скорости ветра между высотами 0 and 60 km взяты из базы данных – реанализа Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA), а между 70 и 100 км – из модели Global Empirical Wind Model (GEWM) (Portnyagin and Solovjova, 2000) с интерполяцией между 60 и 70 км. Профили температуры взяты из модели NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002). Используемые вертикальные профили показаны на рисунке 3D с учетом смещения волнового пакета в пространстве и времени, а также суточных и широтных градиентов в используемых эмпирических моделях.

Обратное лучевое трассирование. С помощью численной модели Погорельцева и Перцева (1995) проведен расчет вертикальной структуры амплитуды и фазы волны для нескольких переменных (вертикальная скорость, возмущения горизонтальной скорости, температуры, давления, – см. рисунок

31С), а также групповой скорости волнового пакета. В качестве входных данных модели задаются горизонтальная длина волны, циклическая частота, амплитуда и вертикальная протяженность источника, а также вертикальные фоновые профили скорости ветра и температуры. Поскольку модель является линейной, а амплитуда источника неизвестна, последняя взята произвольной, поскольку она не влияет на групповую скорость волнового пакета. Траектория волны и время распространения волны вдоль нее показаны на рисунке 31В. Групповая скорость рассчитывалась с шагом в 1 км как плотность потока волнового действия, деленная на плотность волнового действия (волновым действием называется волновая энергия, деленная на частоту волны в системе отсчета, связанной с ветром). Компонента скорости ветра, перпендикулярная волновому вектору, также учитывалась. Она не влияла на вертикальную структуру волны, но приводила к боковому сносу волнового пакета. В результате расчетов было определено положение возможного источника рассматриваемой изолированной гравитационной волны. Положение соответствующих гребней волны, на высоте предполагаемого тропосферного источника показано на рисунке 31А красными линиями. Он располагается на территории Финляндии на горизонтальном удалении от поля С.О. около 650 км и временном удалении около 7 часов.

Поиск и обоснование тропосферного источника. Метеорологические снимки с очень высоким разрешением, полученные с помощью измерений спутникового радиометра AVHRR и обработанные на спутниковой приемной станции Данди (Великобритания), были использованы для идентификации метеорологических структур, генерирующих гравитационные волны в заранее найденном районе. Подходящая структура действительно обнаруживается.

На рисунке 32 (а) показано такое изображение, красными линиями на котором показаны заранее рассчитанные два гребня волны. Протяженная система фронтальной облачности, вращающейся против часовой стрелки

(циклоническое вращение), хорошо видно в районе волны. Вследствие циклонического вращения некоторые нити облачной системы параллельны нужной ориентации волны, а другие – нет. Это означает, что некоторые облачные элементы имели ориентацию, обеспечивающую азимут гравитационной волны, наблюдавшейся в С.О.

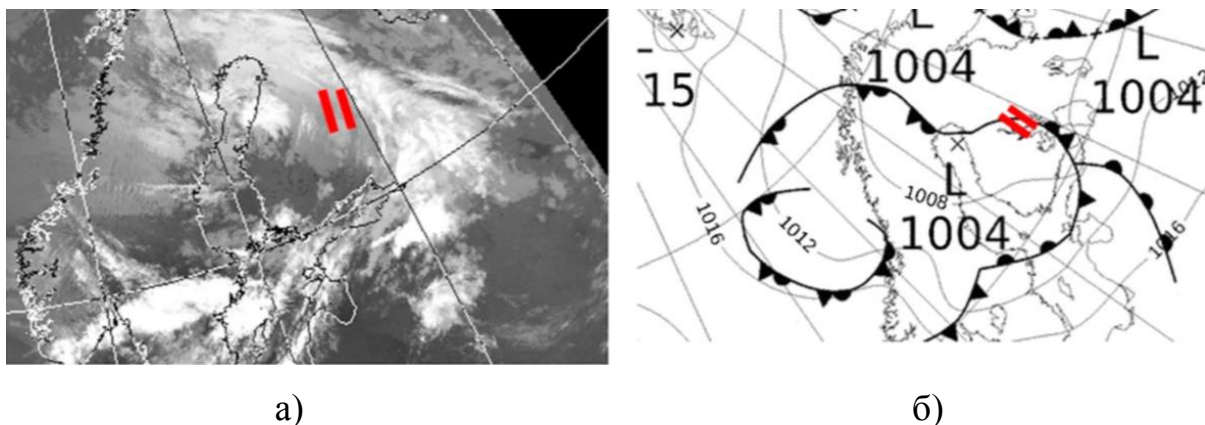


Рисунок 32. Сопоставление снимка со спутника AVHRR с синоптической картой Метеообстановка в Скандинавии на 18 июля 2013 года. (а) – Изображение исследуемой области спутникового радиометра-имаджера AVHRR/MetOp-B ($10.3\text{--}11.3\ \mu\text{m}$) 18 июля 2013, 19:19 UT. Две красных черты показывают расчетное положение волновых гребней на 16:15 UT на высоте 5 км. (б) – Метеорологическая карта на 18:00 UT.

Рисунок 32 (б) иллюстрирует синоптическую карту погоды на 18 июля 2013 года, подтверждающую наличие двух систем низкого давления в непосредственной близости от рассчитанной области генерации волны. Красные линии на карте обозначают расчетное положение гребней. Холодный фронт, связанный с циклоном, как известно, производит грозы и сильные ливни с порывистым ветром (Ahrens, 1994). Кроме того, с запада приближается фронт окклюзии, для которого характерны самые суровые погодные условия, при которых происходит наибольший перепад температур. При этом формирование

гребней волны было достаточно близко к точке окклюзии, что вполне подтверждает наличие источника гравитационной волны в тропосфере. Это во многом соответствует результату Хайнса (1968), который обнаружил тропосферный источник гравитационных волн, наблюдавшихся в С.О., находившихся в передней части фронта окклюзии.

Несмотря на то, что сам факт попадания ОЛТ на фронт окклюзии является серьезным доводом в подтверждение идей Гришина и Хайнса, требуются доказательства того, что эта конкретная метеорологическая структура являлась эффективным генератором атмосферных гравитационных волн. Соответствующая проверка произведена на базе данных MERRA с помощью математической модели (Medvedev and Gavrilov, 1995), параметризующей генерацию атмосферных гравитационных волн за счет нелинейного взаимодействия регулярной мезометеорологической и турбулентной составляющих воздушного потока. Соответствующая функция нелинейного волнового источника представляет собой квадратичную форму, составленную из горизонтальных градиентов горизонтальных компонент ветра:

$$G_0 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$$

Эта функция была рассчитана по полю ветра, предоставляемому базой данных MERRA для барического уровня 550 гПа на 15:00 UT, что довольно близко к расчетному времени генерации волны (16:15 UT на высоте 5 км). Соответствующая карта функции источника, показанная на рис. 33, демонстрирует заметный максимум функции G на уровне $\sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ в районе 28–32°E и 62–64°N. Этот максимум практически совпадает с рассчитанным обратным лучевым трассированием положением источника, отмеченным на карте зелеными полосками. Рассчитанная карта функции G демонстрирует, что

вовсе не весь достаточно протяженный фронт, а сравнительно небольшой его участок, найденный обратным лучевым трассированием, являлся эффективным генератором гравитационных волн. Нужно подчеркнуть, что ни в каких более ранних исследованиях проверка метеорологических структур – кандидатов в источники волновых возмущений, наблюдаемых в мезосфере, на моделях эффективности генерации гравитационных волн, не проводилась.

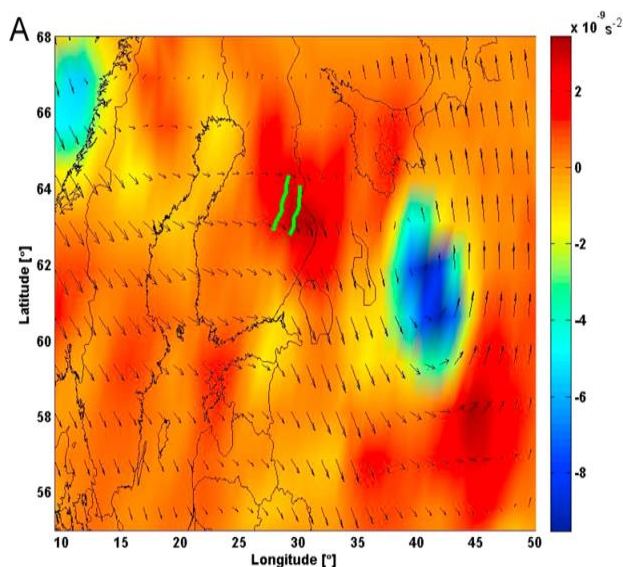


Рисунок 33. Карта функции G нелинейного волнового источника, рассчитанная по базе данных MERRA (550 гПа) на 15:00 UT 18 июля 2013 г. Зелеными линиями отмечено положение гребней волнового источника, найденного обратным лучевым трассированием.

Таким образом, в настоящей главе рассмотрен уникальный случай проявления внутренних гравитационных волн в С.О., зафиксированных подмосковными фотокамерами в ночь с 18 на 19 июля 2013 года. Именно для этого случая детальным численным моделированием и независимой проверкой расчета функции волнового источника впервые с высокой степенью достоверности однозначно найден источник волн – тропосферный фронт окклюзии, что подтвердило гипотезу Гришина о возможности формирования

С.О. тропосферными метеорологическими структурами при посредничестве гравитационных волн.

Следует отметить, что в отличие от многочисленных других проявлений гравитационных волн в С.О., когда волны создают яркостную модуляцию уже наблюдающихся облаков, в данном случае видимые глазом облачные структуры были созданы в поле зрения камер непосредственно волной. Нужно также учесть, что в этом случае происходило видимое движение поля С.О. с запада на восток, – это довольно необычная особенность поведения объекта, так как мезосферные облака обычно движутся с востока на запад из-за преобладающего направления ветра в летней мезопаузе. Уникальность наблюдавшегося явления мезосферной облачности неоспорима, поскольку подобного проявления гравитационных волн в С.О. не отмечалось ни в опубликованной литературе, ни в архиве изображений глобальной сети САПФО за предшествующие 10 лет. Поэтому проведенное исследование частного случая доказывает принципиальную возможность, согласно гипотезе Гришина, создания видимых полей С.О. тропосферными метеорологическими структурами при посредничестве атмосферных гравитационных волн, однако из него не следует, что такие события происходят часто. Гораздо чаще, по-видимому, осуществляется волновая модуляция яркости уже наблюдавшихся до прихода волны серебристых облаков. Впрочем, между этими двумя событиями нет резкой границы, поскольку яркость локальных участков серебристого облака в результате прихода волны может увеличиться и превысить пороговый уровень видимости.

Подход и результаты, изложенные в настоящем разделе, использовались в дальнейших исследованиях тропосферных источников волн, наблюдаемых в серебристых облаках. Так, в работе (Dalin et al., 2015) был детально изучен другой частный случай – весьма протяженные гребни, наблюдавшиеся в

серебристых облаках, и по той же методике выявлен их источник – струйное течение на высоте 8 – 10 км.

Выводы по главе 4:

На основе анализа, наблюдавшихся в ночь с 18 на 19 июля 2013 года вблизи Москвы С.О. изучено действие механизма тропосферно-мезосферных связей на образование мезосферной облачности за счет генерации гравитационных волн в тропосфере и последующего проникновения их в мезосферу. Таким образом, надёжно подтверждено существование связи между метеорологическими структурами в нижних слоях атмосферы и процессами, ответственными за возникновение серебристых облаков.

Заключение

В результате проведенных исследований пространственно-временных характеристик глобального поля серебристых облаков Северного полушария, а также детального анализа стереофотосъемки отдельных случаев появления серебристых облаков с использованием численного моделирования и данных реанализа получены следующие результаты:

1. Впервые в мировой геофизике на основе спутниковых данных создана методика вычислений вариаций размеров площади, занятой мезосферной облачностью, на планетарном масштабе.

2. На основе фотоизображений космического мониторинга, полученных спутником AIM, рассчитан массив данных о суммарной площади полей серебристых облаков в Северном полушарии для шести летних сезонов (2007 - 2012 гг.).

3. Анализ полученных временных рядов позволил обнаружить повторяющуюся из сезона в сезон общую временную закономерность изменения площади глобального поля серебристых облаков Северного полушария. Показано, что эта закономерность достаточно хорошо описывается параболической функцией.

4. Выявлены как общая сезонная закономерность, связанная с возникновением, развитием и деградацией глобального поля серебристых облаков, так и отклонения от нее, а именно, 19 – 27 суточные осцилляции площади, амплитуда и период которых отличается от сезона к сезону.

5. Обнаружены долготные особенности (стационарные возмущения планетарного масштаба) в распределении глобального поля серебристых облаков, которые имеют в период максимального развития мезосферных облаков (июнь-июль) устойчиво повторяющийся характер фазы стационарных волн. Показано, что наибольшие относительные превышения площади

мезосферной облачности обнаруживаются на широтах 50-60° N в Урало-Западносибирском регионе.

6. Выявленные долготные особенности в площадях мезосферной облачности описаны как стационарные планетарные волны. Они являются первым в мировой геофизике надежным свидетельством существования заметных по амплитуде стационарных планетарных волн в летней полярной верхней мезосфере.

7. На основе анализа наблюдавшихся в ночь с 18 на 19 июля 2013 года вблизи Москвы С.О. изучено действие механизма тропосферно-мезосферных связей на образование мезосферной облачности за счет генерации гравитационных волн в тропосфере и последующего проникновения их в мезосферу. Таким образом, надёжно подтверждено существование связи между метеорологическими структурами в нижних слоях атмосферы и процессами, ответственными за возникновение серебристых облаков.

Список литературы

Астапович И.С. 1939. Серебристые облака. Изв. АН СССР. Сер. геогр. геофиз. № 2. С. 183-204.

Бессонова Т.Д. 1963. Видимая частота появления серебристых облаков по наблюдениям станций сети гидрометеорологической службы СССР за 1957–1959 гг. / Исследования по климатологии серебристых облаков. Метеорология и раздел программы МГГ. № 6. М.: АН СССР. С. 23 – 63.

Бронштэн В.А., Гришин Н.И. 1970. Серебристые облака. М., Наука, 360 с.

Бронштэн В.А. 1984. Серебристые облака и их наблюдение. М., Наука, 128 с.

Васильев О.В. 1967. Астрофизические исследования серебристых облаков. М. Изд. Астросовета АН СССР.

Гришин Н.И. 1957. Инструкция для наблюдения серебристых облаков. М.: Изд-во АН СССР. 23 с.

Гришин Н.И. 1957 б. Изучение движений серебристых облаков методом киносъемки. Метеорология и гидрология. №3. С 34-37.

Гришин Н.И. 1958. Изучение движений серебристых облаков. Бюлл. ВАГО. № 21(28). С. 52-60.

Гришин Н.И. 1961. К вопросу о метеорологических условиях появления серебристых облаков// Труды VI Совещания по серебристым облакам. Изд. АН Латв. ССР. Рига. С. 107-140.

Далин П.А., Перцев Н.Н., Ромейко В.А. 2005. Серебристым облакам 120 лет? Природа, № 6, С. 12-21.

Далин П.А., Перцев Н.Н., Ромейко В.А. 2015. Серебристым облакам уже 130 лет. Природа, № 11, С. 18-26

Кропоткина Е.П., Шефов Н.Н. 1975. Влияние лунных приливов на вероятность появления серебристых облаков. Известия АН СССР. ФАО. Т. 11. № 11. С. 1184-1186.

Кудабаева Д.А. 2015. Стационарные долготные неоднородности в площадях мезосферных облаков по данным CIPS/AIM (июнь–июль) // Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 6, – С. 1-4.

Кудабаева Д.А., Солодовник А.А. 2015. Вариации площади глобального поля серебристых облаков Северного полушария в сезоны 2007-2012 гг. // Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 2, -С. 274-278

Перцев Н.Н., Далин П.А., Перминов В.И. 2015. Влияние полусуточных и полумесячных лунных приливов на область мезопаузы по наблюдениям характеристик гидроксильного слоя и серебристых облаков // Геомагнетизм и аэрономия, 2015, том 55, №6, - С. 811-822

Погорельцев А.И., Перцев Н.Н. 1995. Влияние фонового ветра на формирование структуры акустико-гравитационных волн в термосфере// Известия РАН ФАО. Т. 31 N.6 С.755-760.

Покровский К.Д. 1897. Светящиеся ночные облака. // Изв. Русс. Астрон. Общества. Вып. 6. С. 273-289.

Ромейко В.А., Перцев Н.Н., Далин П.А. 2002. Многолетние наблюдения серебристых облаков в Москве: база данных и статистический анализ // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 42 № 5 С. 702-707

Солодовник А.А., Кудабаева Д.А. 2009. Исследование природы серебристых (мезосферных) облаков в связи с проблемой изменения климата Земли. // Материалы четвертой международной студенческой научной конференции «Анализ и моделирование социально-экономических процессов и систем», Омск, – С. 50-51

Солодовник А., Кудабаева Д.А., Бельченко В.Н., Сартин С.А. 2010. Метеорологические процессы в тропосфере Земли и происхождение серебристых облаков // ВЕСТНИК Актюбинского государственного педагогического института, №1, – С.109-114

Солодовник А.А., Кудабаева Д.А., Крючков В.Н., Леонченко А.С. 2011.

Серебристые облака: проблемы образования и вопрос о дефинициях // Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан. Серия физ.-мат. №4, – С.105-110

Солодовник А.А. и Кудабаета Д.А., 2011. Метеорология тропосферы и появления серебристых облаков в сезоны 2010-2011 года. // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы небесных тел и плазменного состояния вещества. Эксперимент и математическое моделирование», Петропавловск, СКГУ, 2011, – С. 44-47

Солодовник А.А., Кудабаета Д.А., Алешин Д.В. 2012. К поиску связи процессов формирования серебристых облаков и погоднo-климатических явлений. // Международная научно-практическая конференция XIX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири» РАН, Сибирское отделение, институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева, Российский фонд фундаментальных исследований. Томск, – 69 с.

Солодовник А.А., Кудабаета Д.А. 2012. Опыт и перспектива изучения серебристых облаков. Часть 1. Проблема образования и дефиниции // Материалы международного научно-практического симпозиума «Таможенный союз: наука и образование без границ», Петропавловск. – С. 246-252

Солодовник А.А., Кудабаета Д.А., Крючков В.Н. 2013. Сезонные и межсезонные вариации площади глобального поля серебристых облаков // Известия НАН РК. Серия: физико-математическая. №3, – С. 102-107

Швед Г.М., 1997. Циркуляция атмосферы // СОЖ. Науки о Земле. Процессы на поверхности Земли. Вып. 3. С. 75-81

Шефов Н.Н., Перцев Н.Н., Шагаев М.В., Яров В.Н. 1983. Орографически обусловленные вариации эмиссий верхней атмосферы. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, т. 19, N 9, 920-926

Шефов Н.Н., Семенов А.И. 2004. Особенности длготно-временного распределения частоты появления серебристых облаков// Геомагн. и Аэрномия. Т. 44, № 2, С. 283-286.

Хвостиков И.А. 1952. Серебристые облака. Природа. Т. 44. №5. С. 49-59

Ahrens, C., 1994. Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment, West Company, New York

Barnett, J., Corney M., 1985. Middle atmosphere reference model derived from satellite data. Middle Atmosphere Program, Handbook for MAO, Vol. 16, K. Labizke, J.J. Barnet, and B. Edwards, Eds., 318 pp.

Chandran, A., Rusch, D., Palo, S., Thomas, G., Taylor, M., 2009. Gravity wave observation from the Cloud Imaging and Particle Size (CIPS) Experiment on the AIM Spacecraft, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 71.

Dalin, P., Pertsev, N., Romejko, V., 2006. Significance of Lunar Impact on Noctilucent Clouds. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 68, N 14, P. 1653-1663.

Dalin, P., Pertsev, N., Zadorozhny, A., Connors, M., Schofield, Shelton, I., Zalcik, I., McEwan, T., McEachran, I., Frandsen, S., Hansen, O., Andersen, H., Sukhodoev, V., Perminov, V., Romejko, V., 2008. Ground-based observations of noctilucent clouds with a northern hemisphere network of automatic digital cameras. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 70, 1460-1472.

Dalin, P., Pertsev, N., Frandsen, S., Hansen, O., Andersen, H., Dubietis, A., Balciunas, R., 2010. A case study of the evolution of a Kelvin-Helmholtz wave and turbulence in noctilucent clouds, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., V. 72(14-15), 1129-1138, doi:10.1016/j.jastp.2010.06.011

Dalin P., Pertsev, N., Dubietis, A., Zalcik, M., Zadorozhny, A., Connors, M., Schofield, I., McEwan, T., McEachran, I., Frandsen, S., Hansen, O., Andersen, H., Sukhodoev, V., Perminov, V., Balčiunas, R., Romejko, V., 2011. A comparison between

ground-based observations of noctilucent clouds and Aura satellite data. *Journal of Atmospheric and Solar- Terrestrial Physics*. V. 73. 2097– 2109.

Dalin, P., Pertsev, N., 2011. Additional notes about NLC long-term behavior according to visual observations.

http://www.cawses.org/wiki/index.php/Project_3_PMC/NLC_altitude,_frequency_and_brightnes_changes_related_to_changes_in_dynamics_and_chemical_composition

Dalin, P., Pertsev, N., Romejko, V., 2012. Notes on historical aspects on the earliest known observations of noctilucent clouds. *Hist. Geo Space. Sci.*, 3, 87-97, doi:10.5194/hgss-3-87-2012; www.hist-geo-space-sci.net/3/87/2012/

Dalin, P., Kirkwood, S., Hervig, M., Mihalikova, M., Mikhaylova, D., Wolf, I., Osepian, A., 2012. Wave influence on polar mesosphere summer echoes above Wasa: experimental and model studies. *Ann. Geophys.*, 30, 1143–1157, 2012 www.ann-geophys.net/30/1143/2012/ doi:10.5194/angeo-30-1143-2012

Dalin, P., Connors, M., Schofield, I., Dubietis, A., Pertsev, N., Perminov, V., 2013. First common volume ground-based and space measurements of the mesospheric front in noctilucent clouds, *Geophysical Research Letters*, 40, doi:10.1002/2013GL058553

Dalin, P., Pogoreltsev, A., Pertsev, N., Perminov, V., Shevchuk, N., Dubietis, A., Zalcik, M., Kulikov, S., Zadorozhny, A., Kudabayeva, D., Solodovnik, A., Salakhutdinov, G., Grigoryeva, I., 2015. Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a tropospheric occluded front. *Geophysical Research Letters*, 42, 2037–2046, doi:10.1002/2014GL062776

Dalin, P., Pogoreltsev, A., Pertsev, N., Perminov, V., Shevchuk, N., Dubietis, A., Zalcik, M., Kulikov, S., Zadorozhny, A., Kudabayeva, D., Solodovnik, A., Salakhutdinov, G., Grigoryeva, I., 2015. Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a

tropospheric occluded front. *Geophysical Research Letters*, 42, 2037–2046, doi:10.1002/2014GL062776

DeLand, M., Shettle, E., Thomas, G., Olivero, J., 2006. A quarter-century of satellite polar mesospheric cloud observations// *Journal of Atmosph. Solar- Terrestrial Physics*. V. 68, 9-29

DeLand, M., Shettle, E., Thomas, G., Olivero, J., 2007. Latitude-dependent long-term variations in polar mesospheric clouds from SBUV version 3 PMC data, *J. Geophys. Res.*, 112, D10315, doi:10.1029/2006JD007857

DeLand., M. T., G. E. Thomas. 2015. Updated PMC trends derived from SBUV data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, V. 120, P. 2140–2166, doi:10.1002/2014JD022253.

Donahue, T., Guenther, B., Blamont, J.F., 1972. *J. Atm. Sci*, 29, 1205.

Dubietis, A., Dalin, P., Balciunas, R., Cernis, K., Pertsev, N., Sukhodoev, V., Perminov, V., Zalcik, M., Zadorozhny, A., Connors, M., Schofield, I., McEwan, T., McEachran, I., Frandsen, S., Hansen, O., Andersen, H., Grønne, J., Melnikov, D., Manevich, A., Romejko, V., 2011. Noctilucent clouds: modern ground-based photographic observations by a digital camera network, *Applied Optics*, 50, 28, F72-F79, doi:10.1364/AO.50.000F72

Dubietis, A., Dalin, P., Balciunas, R., Cernis, K., Pertsev, N., Sukhodoev, V., Perminov, V., Zalcik, M., Zadorozhny, A., Connors, M., Schofield, I., McEwan, T., McEachran, I., Frandsen, S., Hansen, O., Andersen, H., Grønne, J., Melnikov, D., Manevich, A., Romejko, V., 2011. Noctilucent clouds: modern ground-based photographic observations by a digital camera network, *Applied Optics*, 50, 28, F72-F79, doi:10.1364/AO.50.000F72

Fiedler, S., Höll, B., Jungkunst, H., 2005. Methane budget of a Black Forest spruce ecosystem considering soil pattern. *Biogeochemistry* 76 (1), 1–20.

Fogle B., Haurwitz B., 1966. Noctilucent clouds// *Space Science Rev.* V. 6, No. 3, P. 279-340.

Gadsden M., Schröder W. 1989. The nature of noctilucent clouds//Gerlands Beitr. Geophysik. V. 98. No. 5. P. 431-442.

Gerding M., Höffner J., Rauthe M., Singer W., Zecha M., Lübken F.-J. 2007. Simultaneous observation of NLC, MSE and temperature at a mid-latitude station (54° N) // J. Geophys. Res. V. 112. D12111, doi:10.1029/2006JD008135.

Hines, C., 1968. A possible source of waves in noctilucent clouds, J. Atmos. Sci., 25, 937-942.

Jesse, O., 1890. Untersuchungen ueber die sogenannten leuchtenden Nachtwolken. Sitz. - Ber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, p. 1031-1044.

Kaifler, N., Baumgarten, G., Fiedler, J., Latteck, R., Lübken, F.J., Rapp, M., 2011. Coincident measurements of PMSE and NLC above ALOMAR (69° n, 16° e) by radar and lidar from 1999–2008. Atmos. Chem. Phys. 11, 1355–1366. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-11-1355-2011>

Karlsson, B., McLandress, C., Shepherd, T., 2009. Interhemispheric mesospheric coupling in a comprehensive middle atmosphere model. J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 71, 518–530, doi:10.1016/j.jastp.2008.08.006.Kuroda, 2008

Kirkwood, S., Stebel, K. 2003. Influence of planetary waves on noctilucent cloud occurrence over NW Europe, J. Geophys. Res., 108(D8), 8440, doi:10.1029/2002JD002356

Lübken, F.-J., Baumgarten, G., Fiedler, J., von Cossart, G., 2008. Particle properties and water content of noctilucent clouds and their interannual variation. Journal of Geophysical Research 113, 1-13.

Lumpe, J., Bailey, S., Carstens, J., Randall, C., Rusch, D., Thomas, G., Nielsen, K., Jeppesen, C., McClintock, W., Merkel, A., Riesberg, L., Templeman, B., Baumgarten, G., Russell, J., 2013. Retrieval of polar mesospheric cloud properties from CIPS: algorithm description, error analysis and cloud detection sensitivity, J. Atmos. Solar-Terr. Phys, 104, 167-196.

Liu, X., Yue, J., Xu, J., Yuan, W., Russell III, J., Hervig, M., Nakamura, T., 2016. Persistent longitudinal variations in 8 years of CIPS/AIM polar mesospheric clouds, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 8390–8409, doi:10.1002/2015JD024624

Medvedev, A., Gavrilov, N., 1995. The nonlinear mechanism of gravity wave generation by meteorological motions in the atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 57:1,221-1,231

Olivero J., Thomas G., 1986. Climatology of polar mesospheric clouds. *J. Atmosph. Sci.*,V. 46. P. 1263.

Pautet, P.-D., Stegman, J., Wrasse, C., Nielsen, K., Takahashi, H., Taylor, M. J., Hoppel, K., and Eckermann, S., 2011. Analysis of gravity waves structures visible in noctilucent cloud images, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.*, 73, 2082–2090, doi:10.1016/j.jastp.2010.06.001

Picone, J., Hedin, A., Drob, D., Aikin, A., 2002. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research* 107: doi: 10.1029/2002JA009430. issn: 0148-0227.

Portnyagin, Y., Solovjova, T., 2000. Global empirical wind model for the upper mesosphere/lower thermosphere. I. Prevailing wind, *Ann. Geophys.*, 18, 300–315.

Rapp, M., Lübken, F.-J., Müllemann, A., Thomas, G., Jensen, E., 2002. Small scale temperature variations in the vicinity of NLC: Experimental and model results, *J. Geophys. Res.*, 107(D19), 4392, doi:10.1029/2001JD001241.

Rapp, M., Lübken, F.-J., 2004. Polar mesosphere summer echoes (PMSE): review of observations and current understanding. *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 2601–2633, 2004 www.atmos-chem-phys.org/acp/4/2601/

Robert, C. E., C. von Savigny, N. Rahpoe, H. Bovensmann, J. P. Burrows, M. T. DeLand, M. J. Schwartz, 2010. First evidence of a 27 day solar signature in noctilucent cloud occurrence frequency. *J. Geophys. Res.*, 115, D00I12, doi:10.1029/2009JD012359.

Rong P., Russell III J., Hervig M., Bailey S., 2012. The roles of temperature and water vapour at different stages of the polar mesosphere cloud season// J. Geophys. Res. V. 117. D04208, doi:10.1029/2011JD016464.

Russell III, J., Bailey, S., Horanyi, M., Gordley, L., Rusch, D., Hervig, M., Thomas, G., Randall, C., Siskind, D., Stevens, M., Summers, M., Taylor, M., Englert, C., Espy, P., McClintock, W., Merkel, A., 2009. Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM): Overview and early science results, J. Atmos. Solar-Terr. Phys.,71.

Russell, J, Rong, P., Hervig, M., Siskind, D., Stevens, M., Bailey, S., Gumbel, J., 2014. Analysis of northern midlatitude noctilucent cloud occurrences using satellite data and modeling, J. Geophys. Res. - Atmosphere, 119, 3238–3250, doi:10.1002/2013JD021017.

Shettle, E., Thomas, G., Olivero, J., Evans, W., Debrestian, D., Chardon, 2003. Three satellite comparison of polar mesospheric clouds: Evidence for long-term change, J. Geophys. Res., 107(D12), 4134, 10.1029/2001JD000668

Stray, N., Espy, P., Limpasuvan, V., Hibbins, R., 2015. Characterization of quasi-stationary planetary waves in the northern MLT summer, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 127, 30-36, doi:10.1016/j.jastp.2014.12.003

Taylor, M., Pautet, P.-D., Zhao, Y., Randall, C., Lumpe, J., Bailey, S., Carstens, J., Nielsen, K., Russell III, J., Stegman, J., 2011. High-latitude gravity wave measurements in noctilucent clouds and polar mesospheric clouds. Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series, vol. 2, part 1, 93-105.

Thayer, J., Rapp, M., Gerrard, A., Gudmundsson E., Kane, T., 2003., Gravity wave influences on Arctic mesospheric clouds as determined by a Rayleigh lidar at Sondrestrom, Greenland, J. Geophys. Res., 108(D8), 8449.

Thomas, G. E., B. Thuraiajah, M. E. Hervig, C. von Savigny, M. Snow. 2015. Solar-induced 27-day variations of mesospheric temperature and water vapor

from the AIM SOFIE experiment: Drivers of polar mesospheric cloud variability, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 134, 56–68, doi:10.1016/j.jastp.2015.09.015.

Wilms, H., Rapp, M., Hoffmann, P., Fiedler, J., Baumgarten, G., 2013. Gravity wave influence on NLC: experimental results from ALOMAR, 69° N, *Atmos. Chem. Phys.*, Volume 13, Issue 23, pp.11951-11963, 2013, DOI: [10.5194/acp-13-11951-2013](https://doi.org/10.5194/acp-13-11951-2013)

Yue, J., Thurairajah, B., Hoffmann, L., Alexander, J., Chandran, A., Taylor, M., Russell III J., Randall, C., Bailey, S., 2014. Concentric gravity waves in polar mesospheric clouds from the Cloud Imaging and Particle Size experiment, *J. Geophys. Res. Atmos.*, V. 119, P. 5115–5127, doi:10.1002/2013JD021385.

Yue, J., Thurairajah, B., Hoffmann, L., Alexander, J., Chandran, A., Taylor, M., Russell III, J., Randall, C., Bailey, S., 2014. Concentric gravity waves in polar mesospheric clouds from the Cloud Imaging and Particle Size experiment, *J. Geophys. Res. Atmos.*, V. 119, P. 5115–5127, doi:10.1002/2013JD021385