



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Оценка характеристик волновых сигнатур в поле полярных мезосферных облаков»

Исполнитель Соколов Арсений Викторович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук

(ученая степень, ученое звание)

Савенкова Елена Николаевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«2» июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| 1. Полярные мезосферные облака как индикатор динамических процессов средней атмосферы | 5 |
| 1.1. История изучения полярных мезосферных облаков | 5 |
| 1.2. Основы теории зарождения и существования облачных полей | 9 |
| 1.3. Дополнительная информация про полярные мезосферные облака и методы их наблюдения | 15 |
| 2. Теоретическая справка и источники данных | 21 |
| 2.1. Описание волновых движений в атмосфере | 21 |
| 2.2. Описание инструментов для получения и работы с данными | 28 |
| 3. Оценка характеристик волновых сигнатур в поле полярных мезосферных облаков | 32 |
| 3.1. Межгодовая изменчивость сезона серебристых облаков | 32 |
| 3.2. Временные ряды и вейвлет-анализ | 34 |
| Заключение | 39 |
| Список использованных источников | 41 |

ВВЕДЕНИЕ

По мере развития метеорологии, в частности изучения вертикального строения атмосферы, ученых начал интересовать вопрос о физических и динамических процессах средней и верхней атмосферы. Сначала создавались гипотезы и теоретические модели, которые позже подтверждались (или опровергались) благодаря растущим возможностям проведения измерений на высотах выше 20-30 км. Конечно, в первую очередь, речь идет о ракетных и спутниковых наблюдениях, появившихся уже после второй мировой войны, которые позволили представить наиболее чёткую картину строения средней и верхней атмосферы.

На основе собираемых десятилетиями данных, удалось получить представление об общей характеристике сезонных и широтных циркуляций. В средней и верхней атмосфере наблюдаются переменного масштаба изменения параметров среды, которые обуславливаются атмосферными волнами. За это время в науке стали оперировать понятиями орографических, гравитационных, планетарных волн, а также волн Гельмгольца и приливов, являющих собой распространение возмущений среды, обуславливающие перенос энергии и импульса. Главной отличительной чертой атмосферных волн является их существенные горизонтальные размеры (десятки и даже тысячи километров).

Атмосферные волны имеют различное происхождение. Это может быть одновременный разрыв плотности или сдвиг ветра (волны Гельмгольца), либо же изолированное возникновение этих явлений (гравитационные волны), крупномасштабные преобразования полей движения и давления (волны Россби), разрыв на поверхности раздела, вызванный препятствием (орографические волны). Либо же это могут быть волны планетарного масштаба, создаваемые притяжением Солнца и Луны, усиливающиеся суточным ходом температуры (приливные волны). Волны проникают из нижних слоёв атмосферы в мезосферу, либо же генерируются локально. Усиление

волновых потоков в мезосфере обуславливается её относительной неустойчивостью, возникающей в связи с малой плотностью слоя. Помимо этого, существует наложение вихрей переменного масштаба, что является причиной возмущенности мезосферы и создает трудности в ее исследовании.

Однако, несмотря на все ныне существующие достижения науки и техники, вопрос об изучении верхней атмосферы весьма обсуждаем в учёных кругах. Развитие науки и техники происходит немислимыми темпами: совершенствуются старые методы измерений, появляются новые. Однако, до сих пор не удалось в полной мере представить истинную картину свойств средней атмосферы, ее динамических характеристик, её взаимодействия с ниже- и вышележащими слоями, а также влиянием её характеристик на климат в целом. Остро стоит вопрос о наличии иных способах наблюдения и регистрации мезосферных явлений. В учёных кругах не принято оставлять без обработки ни единого наблюдения. Как раз одним из таких наблюдений являются самые высокие облака, существующие в атмосфере Земли.

Целью работы является оценка характеристик волновых сигнатур в поле полярных мезосферных облаков. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: (1) По записям наблюдений за серебристыми облаками, составить архив числа ночей с серебристыми облаками в Северной Европе за летние месяцы с 2008 по 2022 года; (2) На основании составленного архива, выявить года, в которые наблюдалось наибольшее и наименьшее количество ночей с серебристыми облаками; (3) По результатам спутниковых измерений (AIM/CIPS), составить архив дат начала, окончания и продолжительности сезонов активности серебристых облаков за 15 лет, получить для конкретных годов временные ряды температуры и водяного пара (Aura/MLS); (4) Выполнить вейвлет-анализ временных рядов и выявить волновые сигнатуры.

1. ПОЛЯРНЫЕ МЕЗОСФЕРНЫЕ ОБЛАКА КАК ИНДИКАТОР ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ

1.1. История изучения полярных мезосферных облаков

Серебристые облака, также известные, как ночные светящиеся облака – самые высокие облачные образования, встречающиеся в земной атмосфере, существующие в мезопаузе, переходном слое между мезосферой и термосферой, на высотах 75-90 км. Наиболее часто их можно наблюдать с земли в летнее время (с мая по сентябрь, с пиком в начале июля), между 50 и 75° с. ш. и 40 и 60° ю. ш., а видны они лишь на фоне сумеречного неба, потому что светятся отраженным светом Солнца (преимущественно, серебристо-синее свечение). При определённых углах склонения Солнца над горизонтом, эти облака уже не будут различимы. Как правило, они видны невысоко над горизонтом, на высоте 3-10° в северной части неба (в Северном полушарии). При наблюдении из космоса, эти облака получили название полярные мезосферные облака. Представляют собой тонкий (около 1 км) слой ледяных частиц, радиусом в десятки нанометров. Слой этих облаков настолько тонкий, что не перекрывает собой свет звёзд и прочих небесных тел.

Помимо того, что это самые необычные, самые высокие и, пожалуй, одни из самых удивительных явлений на планете, серебристые облака являются одним из способов по наблюдению за динамикой мезосферы. Иными словами, полярные мезосферные облака – индикатор динамических процессов в средней атмосфере. Волновые явления откладывают свой отпечаток на форму и структуру облачного слоя. Главной особенностью данного метода является возможность длительных и непрерывных наблюдений за эволюцией облачного массива, на основании которой можно судить о характере динамических процессов, которые иначе трудно отследить. Действительно, полярные мезосферные облака являются отличным индикатором вариаций характеристик в области мезопаузы, где знания ученых о процессах ограничены.

Учёные интересуются полярными мезосферными облаками уже на протяжении более ста лет. Первое официально подтвержденное появление серебристых облаков датируется 12 июня 1885 года и принадлежит русскому профессору-астроному, директору Московской обсерватории, Витольду Карловичу Церасскому (1849-1925 гг.), занимавшемуся в то время фотометрией блеска звёзд. Следует отметить, что не он один заметил эти облака. Несколькими днями ранее, с интервалом в пару дней, эти облака были замечены над Европой двумя другими учеными (Т. Бакгаузом и Вацлавом Лаской). Однако, в отличие от Витольда Карловича, они воздержались от подробного изучения и документации этого явления. Поэтому, можно сказать, что именно Цераский является основоположником изучения серебристых облаков. Также, он был первым, кто запечатлел эти облака на фотокамеру (но, к сожалению, фотографии были утеряны), и даже измерил высоту облаков по наблюдениям из двух пунктов. Среднее из четырех наблюдений значение высоты равнялось 79 км, что очень близко к современным данным. Несколькими неделями позже, серебристые облака наблюдали и другие учёные (в частности, немецкий метеоролог Отто Иессе, который и ввёл термин «серебристые облака») со всей Европы. Именно О. Иессе настоял на том, чтобы привлечь к новому явлению как можно больше заинтересованных лиц. С этих пор началось постепенное развитие наблюдений за серебристыми облаками. 20 декабря 1888 года полярные мезосферные облака были замечены в Южном Полушарии, в Чили. Их наблюдал Штубенрах. Четыре года спустя интенсивность появления полярных мезосферных облаков резко упала, что вызвало уменьшение количества наблюдений и лишь в 1908 году случился новый прилив интереса к этим облакам, связанный с возникновением необычных оптических явлений из-за падения Тунгусского метеорита. С каждым десятилетием интерес к серебристым облакам лишь возрастал; наблюдения продолжались вплоть до 1939 года. Дальнейшие исследования были прерваны войной. В послевоенные годы интерес усиливался. В ход вступили ракетные наблюдения (1952 год). 18-19 марта 1965 года советский космонавт А. А. Леонов имел возможность

наблюдать серебристые облака с борта космического корабля «Восход-2». Пять лет спустя их наблюдал В. И. Севастьянов с борта «Союза-9». Еще три года спустя, в мае и первой неделе июля их наблюдал член экипажа станции «Скайлэб» П. Вейтц. В последующие годы количество наблюдений серебристых облаков с орбитальных станций возрастало и становилось более систематизированным. За прошедшее столетие создавались специальные комиссии по наблюдению облаков, строились специальные исследовательские пункты и многие учёные (как метеорологи, так и геофизики, и астрономы) занимались изучением этого явления. Интересный факт, что в США изучением серебристых облаков начали заниматься только в 1933 г. Вероятно, до этого на них банально не обращали внимания [1].

Первая гипотеза возникновения полярных мезосферных облаков была предложена немецким физиком Ф. Кольраушем и поддержана О. Иессе в 1887 году и просуществовала 40 лет. Она заключалась в том, что облака образовались в результате конденсации паров, занесенных в верхние слои атмосферы вследствие извержения вулкана Кракатау в Индонезии 27 августа 1883 года. Тогда в атмосферу было выброшено более 35 млн тонн вулканической пыли и водяного пара. В 1926 году Л. А. Кулик выдвинул гипотезу о метеорном происхождении облаков, которая объяснялась тем, что продукты распыления метеоритов и продукты испарения метеоров являются источниками для формирования частиц серебристых облаков. Эта теория просуществовала 30 лет. Новая гипотеза появилась приблизительно в 1925-1926 гг. Конденсационная гипотеза была предложена А. Вегнером и В. Ярдецким. Она гласила, что полярные мезосферные облака образуются в результате конденсации водяного пара и состоят из кристалликов льда. «Недостатком» этой гипотезы служило то, что для образования ледяных кристалликов на высоте около 80 км должны существовать низкие температуры, порядка 150 К. Как известно, в те годы представление о температуре на этой высоте были иными. Считалось, что температура могла доходить до 300 К. Эта теория о температуре просуществовала до начала 50-х годов, когда ракетные измерения средней

атмосферы показали учёным истинные температуры на данных высотах. Оставалось понять: возможно ли существование на таких высотах водяного пара в количестве, достаточном для образования облаков? По данным наблюдений некоторых исследователей, максимальная концентрация водяного пара на высотах 16-40 км составляла $3 \cdot 10^{-4}$ (и даже меньше). Но, в 1955 г. во время ракетного зондирования верхних слоев атмосферы, с целью получения спектров свечения неба на разных высотах, Морская исследовательская лаборатория США получила данные, из которых стало ясно, что на высоты 80-90 км приходится максимум содержания гидроксидов OH. Позже, в Центральной аэрологической обсерватории (СССР) с 1964 по 1965 гг. проводились ракетные измерения с целью прямого содержания водяного пара на высотах 70-90 км. Результаты этих измерений, опубликованные несколькими годами позже, показали, что концентрация водяного пара на высотах 75-80 км достигает своего максимума, заключенного между 10^{-2} и 10^{-3} . Более поздние исследования показали, что максимум концентрации наблюдается в июле-августе, а минимум в январе-феврале. Помимо этого, известно, что влажность в мезопаузе в средних широтах выше, чем в тропиках. Основным источником влаги в области мезопаузы считают восходящие токи воздуха (образующиеся в стратосфере в летний период), которые переносят водяной пар на соответствующие высоты. Далее, на этих высотах водяной пар вымерзает, что приводит к образованию полярных мезосферных облаков. Важными факторами накопления водяного пара на этих высотах является сильно устойчивая стратификация атмосферы ($\gamma \leq 0$) выше 85 км (в области мезопаузы), и преобладание давления на рассматриваемых высотах над давлением насыщения ($E < p$), что говорит о возможности достижения состояния насыщения водяным паром ($e = E$) [2]. Наиболее вероятное происхождение ядер конденсации для образования облаков – это метеорные частицы. Такая гипотеза была высказана в 1950 г. Позднее было обнаружено преобладание аэрозольного слоя на высотах около 80 км. Помимо этого, существуют ещё некоторые версии: образование серебристых облаков путём

коагуляции мельчайших частичек, или происхождение ядер конденсации, как следствие образование кластеров ионов.

Как бы то ни было, вопрос о происхождении мезосферных облаков остался без ответа. Многие гипотезы и факты неполны и противоречивы. Поэтому, облачность в слое мезопаузы остаётся волнующей проблемой для многих естествоиспытателей.

1.2. Основы теории зарождения и существования облачных полей

Морфологическая классификация серебристых облаков была предложена Н. И. Гришиным в 1955 г. Рассмотрим эту классификацию, без учёта мельчайших подробностей облачной структуры:

- 1) Флер – тонкий, частично однородный облачный слой;
- 2) Полосы, могут быть как размытыми, так и резко очерченными. Всегда вытянуты по направлению движения облаков и, при наблюдении с земли, сходящиеся к одной точки горизонта в силу перспективы;
- 3) Гребешки – волны относительно малой длины, или волнообразные изгибы всего облачного поля;
- 4) Завихрения, вплоть до образования облачных вихрей или колец, диаметром от 60 до 100 км, имеющих тёмное пространство в середине.

При рассмотрении взаимосвязи отдельных облачных структур и вероятных путей их происхождения, скажем, что флер является своего рода предвестником прочих, более сложных форм. Однако, в отдельных случаях, он так и остаётся единственной формой облачного слоя. Как правило флер имеет сравнительно малую яркость. Полосы генетически связаны с эволюцией флера. Вероятно, наличие в мезосфере локальных струйных течений приводит к увеличению воздушными течениями некоторой массы флера и образованию из него широких полос. Как уже было отмечено ранее, наибольший интерес представляют волновые образования в полярных мезосферных облаках.

Облачный слой располагается по волновой поверхности мезопаузы, воспроизводя колебания этого слоя. Волновые процессы средней атмосферы играют важную роль в понимании природы полярных мезосферных облаков. Одной из примечательных особенностей является изменение видимой яркости облачного поля в результате его искривления, вызванного волновой активностью. Расстояние между соседними гребешками варьируется в диапазоне от 6 до 12 км (среднее значение – 7,2 км) [1]. Между соседними полосами расстояние намного больше – 30-100 км.

Б. Фогля показал, что наибольшее количество образований в полярных мезосферных облаках приходится на длину волны 10 км, что мало отличается от среднего расстояния между гребешками.

Были случаи, когда регистрировались несколько уровней полярных мезосферных облаков, с интервалом 3-5 км.

По результатам многократных наблюдений, было замечено, что серебристые облака перемещаются, как правило с востока на запад, со скоростью от 180 до 900 км/ч.

Волновая активность в полярных мезосферных облаках всё больше и больше привлекает интересы ученых на протяжении последних десятилетий. Гравитационные волны включают в себе глобальные различия свойств среды в направлении перемещения. Это может быть деформация поля плотности, вертикальные смещения или сублимация, в результате локального потепления атмосферы. Например, проникающие в верхние слои атмосферы волны Гельмгольца, вызванные разрывом или скачком ветра на границе двух воздушных слоев разной температуры, или внутренние гравитационные волны, возникающие при обтекании горных хребтов или антициклонов (алеутский антициклон и т. п.). Всё это оставляет свой след на облачном покрове, вызывая рождение разнообразных облачных структур. Т. к. облака управляются сложными микрофизическими процессами, с большими постоянными по времени, серебристые облака откликаются на динамическую активность

сложными и необратимыми способами. Несколько лет назад учёные наблюдали в облаках блуждающую гравитационную волну, вызывающую сильные температурные возмущения 14-18 К.

К слову, проявления свойств волн Гельмгольца мы можем наблюдать в тропосфере, когда образуются волнистые Cc, Ac и Sc (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца) [3].

Волновые образования в полярных мезосферных облаках всё время перемещаются. При этом, некоторые волны исчезают, другие образуются вновь. Наиболее нагляднее это заметно при замедленной киносъемке.

Характер волновых движений может быть таков, что перемещения тех или иных деталей, особенно узлов плотности и «гребней» волн, могут быть лишь кажущимися и не связанными с реальными перемещениями вещества облаков, а вызванными подъёмом или опусканием волновой поверхности. При наблюдении полярных мезосферных облаков необходимо помнить об этом.

Вероятно, первым, кто установил взаимосвязь между тропосферными источниками (фронтами и струйными течениями) и основными волновыми системами, наблюдаемыми в полярных мезосферных облаках, был Хинс (1968 г.). В первую очередь заслуживают внимания свободно-распространяющиеся волны, вызываемые фронтами. Энергия источника таких волн может преодолевать большие расстояния. С помощью построенной модели, основанной на анализе волновых возмущений на больших высотах, вызванных ядерным взрывом, было доказано, что свободно-распространяющиеся волны могут достигать высот мезопаузы и откладывать свой отпечаток на облачном слое [4]. Струйные течения, являющиеся сильными ветрами верхней тропосферы, служат источником гравитационных волн. Некоторые полагают, что источником гравитационных волн может служить глубокая конвекция.

Но, на практике, верхнетропосферное струйное течение должно отфильтровывать волны, медленно движущиеся в направлении северо-восток –

юг. Т. е. источник такого типа гравитационной волны расположен внутри струйного течения, в тропопаузе. С одной стороны, летом восходящие воздушные течения в стратосфере и мезосфере обеспечивают благоприятные условия для распространения волны в область мезопаузы. С другой стороны, геострофическая составляющая поля ветра и поля давления являются важным источником образования гравитационных волн, и геострофическая составляющая струйного течения обеспечивает образование гравитационной волны, способной проникнуть на уровень мезопаузы [4].

Исследования П. Далина показали, что сильные горизонтальные сдвиги ветра на высоте около 5 км, вызванные прохождением фронта окклюзии, может возбудить гравитационные волны. В девяностых годах прошлого столетия, Маркс и Экерманн разработали трехмерную модель для отслеживания перемещений гравитационных волн. Такая модель позволяет интерпретировать наземную и спутниковую метеорологическую информацию, и некоторые широкомасштабные численные модели. Для этой модели используется вертикальная структура гравитационной волны, с учётом реальных параметров ветра и температуры на разных высотах, и с учетом эффектов турбулентной и молекулярной теплопроводности, вязкости, а также рассеивания гравитационной волны вследствие радиационного теплообмена. Не секрет, что все эти параметры присутствуют в средней атмосфере. Как показывают некоторые расчёты, энергия волны, распространяющихся вверх, может частично отражаться в областях с частичной волновой диссипацией в термосфере. Отраженные вниз волны, могут мешать исходной волне распространяться вверх, вызывая ошибки в отслеживании траектории перемещения волны.

Наблюдения за трансформацией структуры полярных мезосферных облаков позволили сделать вывод, что гравитационные волны могут проявляться на значительном вертикальном удалении от источника возмущений [5]. Как показывает практика, подавляющее большинство гравитационных волн

имеют следующие особенности: период от 10 минут до 4 часов, горизонтальная длина волн λ_x от 50 до 600 км, фазовая скорость в пределах от 18 до 180 км/ч. Как было сказано выше, волны могут возникать от тропосферных источников (фронтов, струйных течений). Это случается при условии, что время существования квазистационарного источника волны превышает несколько периодов гравитационной волны. Как показывают некоторые численные модели, вероятность генерации гравитационной волны тем меньше, чем больше период волны. Также, основываясь на некоторых моделях, учёные построили предположение, что волны Гельмгольца возникают из-за внутренних гравитационных волн большой амплитуды.

Следует учитывать, что для наблюдения модуляции волны из-за распространения гребней гравитационных волн, длиной около 500 км, должно существовать огромное поле полярных мезосферных облаков, имеющих примерно такие же горизонтальные размеры [6]. В силу сложности взаимодействия крупномасштабных волн (гравитационных, планетарных волн и приливов) подобное наблюдается редко. В действительности же наблюдаются большие промежутки в полях серебристых облаков, вызванные распространением крупномасштабных волновых процессов, которые не позволяют наблюдать протяженные гребни гравитационных волн с короткой длиной волны.

Помимо наблюдений за полярными мезосферными облаками, определением их высоты и формы, а также развёртки формы облака на земную поверхность, построения сечений и определения их оптико-физических характеристик, важно учитывать также профили метеорологических элементов на соответствующих высотах. Эти профили получаются, как правило, не только с помощью измерений, но и с использованием моделей.

Изображение серебристого облака, полученное автором настоящей работы, представлено на рисунке 1. Желтой пунктирной линией отмечена область волновой активности в облачном поле. На этом снимке отчетливо

видны гребни волны плавучести. Помимо этого, можно выделить звезду, видную сквозь тонкий слой облачного поля.



Рисунок 1 - Серебристое облако над Вологодской областью (59° с. ш., 37° в. д.)
08/10/2022 18:57 ВСВ

Н. Перцев и П. Далин провели исследование влияния фоновых условий атмосферы на возникновение полярных мезосферных облаков. На рисунке 2 показаны результаты измерений, проведенных инструментом the Microwave Limb Sounder (MLS) (находится на борту спутника Aura, принадлежащего NASA) на высоте $\sim 0,0046$ гПа в регионе 60° с. ш. летом 2007, 2008 годов. Из графика видно, что чаще всего облака возникают при температуре ниже 147 К и относительной влажности большей или равной 100%. Однако, в некоторых случаях, облака возникают при влажности менее 50%. Иногда, даже в условиях

пересыщения, когда значения влажности близки к 10000%, облаков не наблюдалось. Скорее всего, такие уникальные случаи связаны с ошибками в измерениях, вызванными крупномасштабными атмосферными возмущениями [7].

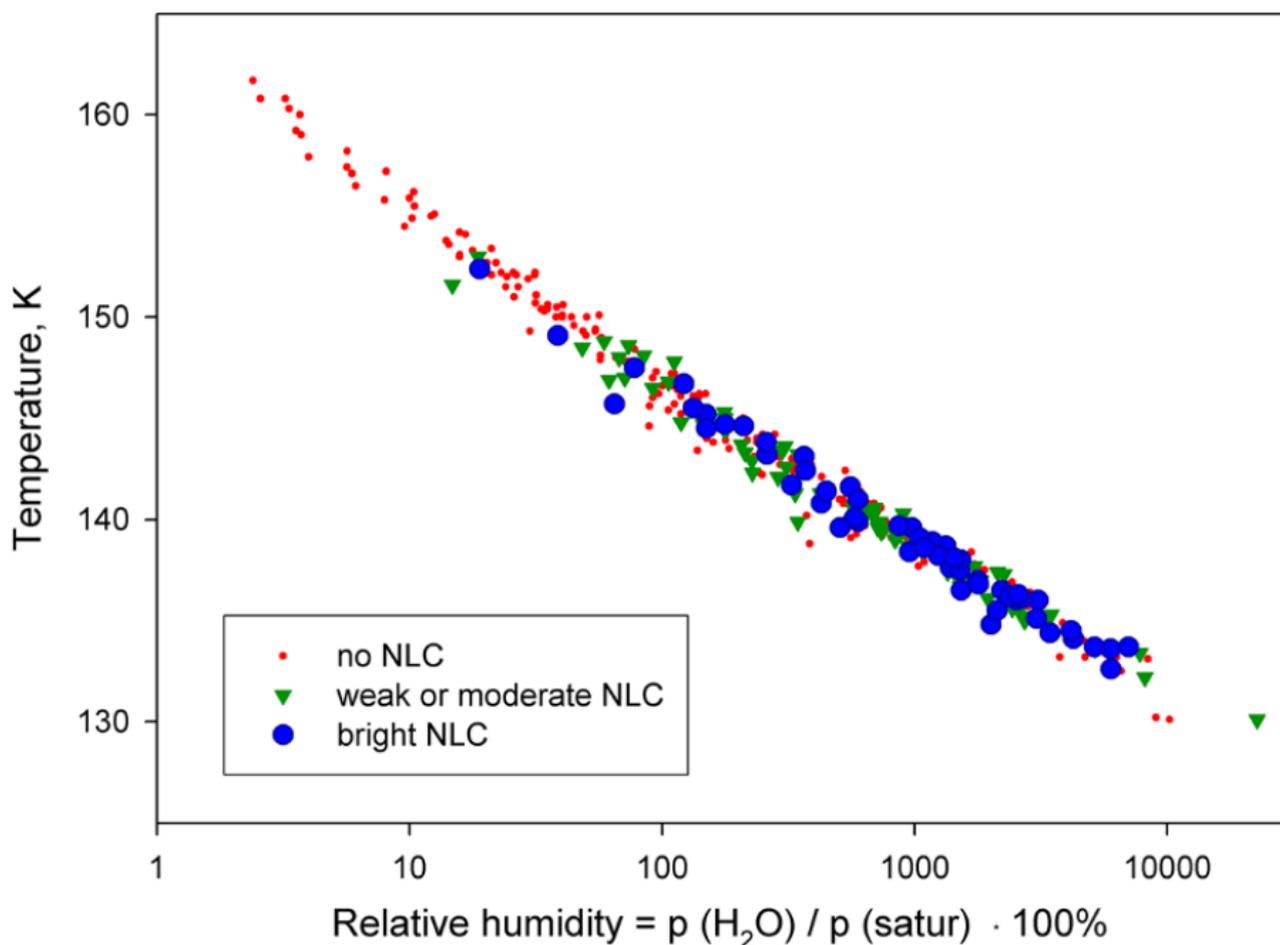


Рисунок 2 - Зависимость возникновения полярных мезосферных облаков от условий мезосферы

1.3. Дополнительная информация про полярные мезосферные облака и методы их наблюдения

1.3.1. Вычисление высоты облачного поля и его проекция на земную поверхность

Уравнение для определения высоты полярного мезосферного облака:

$$H_1 = \frac{R \cos(E_1)}{\cos(E_1 + S_1)} - R. \quad (1)$$

В этом уравнении:

$$\sin(s_1) = \frac{\sin(S)\sin(\psi)}{\sin(\lambda)}, \quad (2)$$

где

$$\cos(\lambda) = -\cos(\psi_1)\cos(\psi_2) + \sin(\psi_1)\sin(\psi_2)\cos(S), \quad (3)$$

где

$$\psi_1 = A_1 - A_{nlc_1}, \quad (4)$$

$$\psi_2 = A_1 - A_{nlc_2}. \quad (5)$$

В этой цепочке уравнений используются следующие обозначения: R — средний радиус кривизны эллипсоида в точке, близкой к положению облака; E_1 — вертикальный угол, полученный при наземном измерении облачности с первого пункта наблюдения; $A_{1,2}$ — азимутальные углы линии базы; $A_{nlc_{1,2}}$ — измеренные азимутальные углы облака с обоих пунктов наблюдения; S_1 — расстояние от первой точки наблюдения до точки земной поверхности, на которую проецируется облако; S — угловое расстояние на поверхности земли между пунктами 1 и 2.

H_1 есть функция двух переменных — угла подъема, E , и угла азимутального, A . Это можно записать следующим образом:

$$F = f(E, A). \quad (6)$$

Как и при измерении любой другой физической величины, при измерении высоты облака также бывают ошибки и неточности. Рассмотрим их.

Ошибки при измерении F описываются следующим уравнением:

$$m_F = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial E}\right)^2 m_E^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)^2 m_A^2}, \quad (7)$$

где $m_{E,A}$ — ошибки в измерении угла подъёма и азимутального соответственно.

Теперь переходим к уравнениям частных производных:

$$\frac{\partial F}{\partial E} = R \left[\frac{-\cos(E_1+S_1)\sin(E_1) + \cos(E_1)\sin(E_1+S_1)}{(E_1+S_1)} \right], \quad (8)$$

$$\frac{\partial F}{\partial A} = D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \cdot D_4 \cdot D_5 \cdot D_6, \quad (9)$$

где

$$D_1 = R \frac{\cos(E_1) \sin(S_1 + E_1)}{(E_1 + S_1)}, \quad (10)$$

$$D_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin(S) \sin(\psi_2)}{\sin(\lambda)}\right)^2}}, \quad (11)$$

$$D_3 = \cos \lambda, \quad (12)$$

$$D_4 = - \frac{1}{\sqrt{1 - (\sin(\psi_1) \sin(\psi_2) \cos(S) - \cos(\psi_1) \cos(\psi_2))^2}}, \quad (13)$$

$$A_5 = \cos(\psi_1) \sin(\psi_2) + \sin(\psi_1) \cos(\psi_2) \cos(S). \quad (14)$$

После рассмотрения возможности определения высоты серебристых облаков коснемся некоторых сведений о проекции поля облаков на земную поверхность. Переход от снимка облака в проекции на небесную сферу к схеме пространственного расположения облачного поля на земную поверхность называется разворачиванием. Результат полученный в ходе разворачивания называется разверткой. Развертка помогает при изучении свойств облачного поля и его структуры.

Для достижения поставленной цели необходимо знать следующие параметры:

- А. Фокусное расстояние (F) фотоаппарата;
- В. Положение и горизонтальные координаты центра фотографии;
- С. Положение линии горизонта на фото;
- Д. Координаты пункта наблюдения.

Последовательную цепочку уравнений и схематических изображений здесь не рассматривается. Скажем лишь, что на их основании получены некоторые инструменты для работы с облачными снимками. На рисунке 3 представлена палетка для измерения координат серебристых облаков ($F' = 250$ мм; $h_0 = 6^{\circ}07'$). Здесь $F' = F \cdot L / l$ – эффективное фокусное расстояние, h_0 - высота центра фотографии.

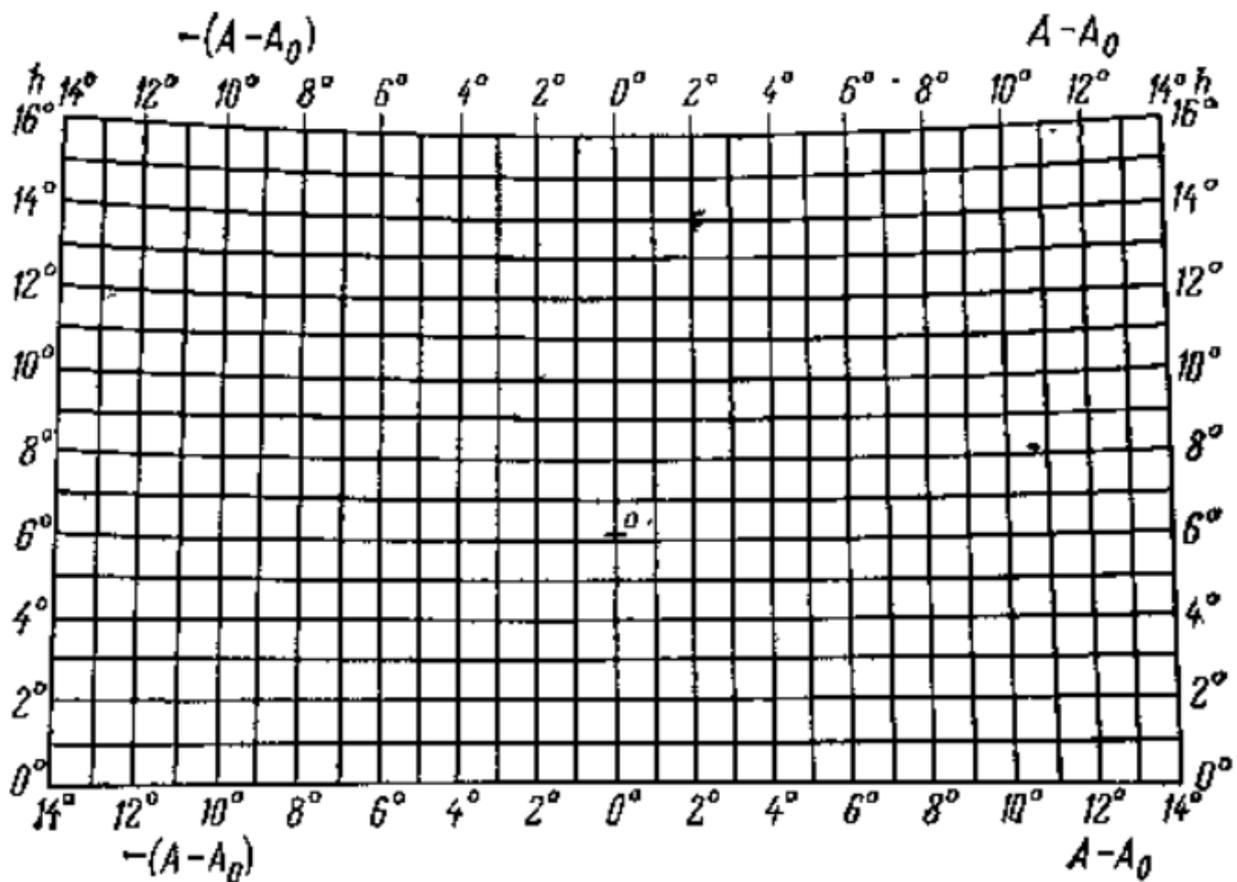


Рисунок 3 – Палетка для определения координат полярного мезосферного облака

На рисунке 4 показан принцип наложения палетки на облачный снимок.

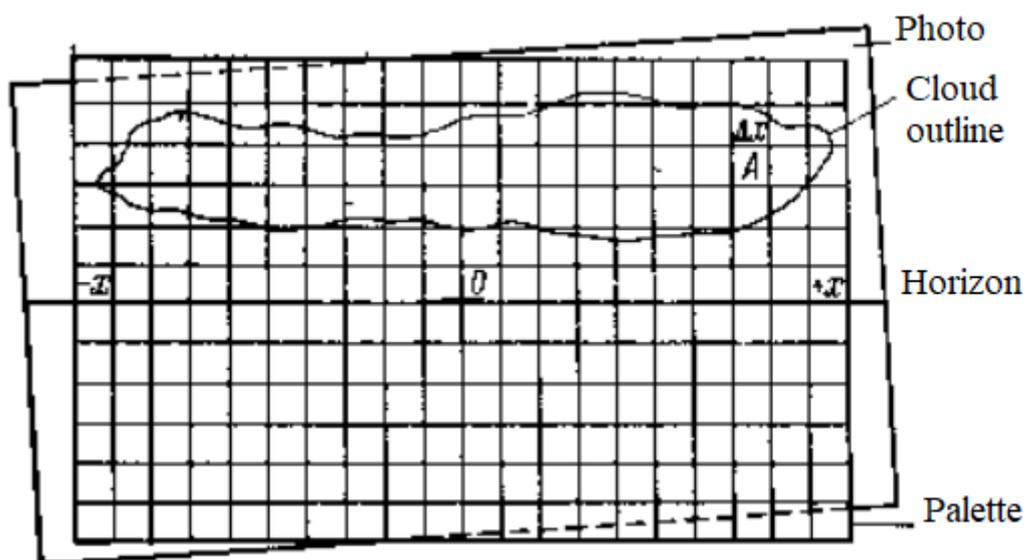


Рисунок 4 – Способ наложения палетки на снимок облака

1.3.2. Пояснения к серебристому (голубоватому) цвету облачного поля

Приведем основные положения, обуславливающие существование голубоватого оттенка серебристых облаков. Для этого обратимся к основам теории рассеяния света в атмосфере.

Если электромагнитная волна падает на крупную частицу (своими размерами сравнимую с λ), в разных точках которой фаза неодинакова, то такие частицы не рассматриваются в качестве излучающих диполей. Тогда переходят к рассмотрению излучающих систем высших порядков, например, квадруполь. Речь идёт про рассеяние на крупных частицах. Г. Ми и Ляв были основателями теории такого рассеяния.

Абсолютный показатель преломления воды в пределах ультрафиолетового и видимого участков спектра незначительно убывает с ростом λ . Среднее значение абсолютного показателя преломления $n = 1,33$.

Исходя из теории, формула для объемного показателя ослабления k_λ выглядит так:

$$k_\lambda = \pi r^2 K(\mu, m) N, \quad (15)$$

где $K(\mu, m)$ – функция от $\mu = 2\pi r/\lambda$ и m (комплексного показателя преломления).

$$m = n(1 + i\kappa), \quad (16)$$

где κ - характеристика поглощения ($4\pi\kappa = k\lambda$), k – показатель поглощения.

На основании уравнения (15) В. Шулейкин и Р. Пенндорф получили график функции $K(\mu, m)$, показанный на рисунке 5.

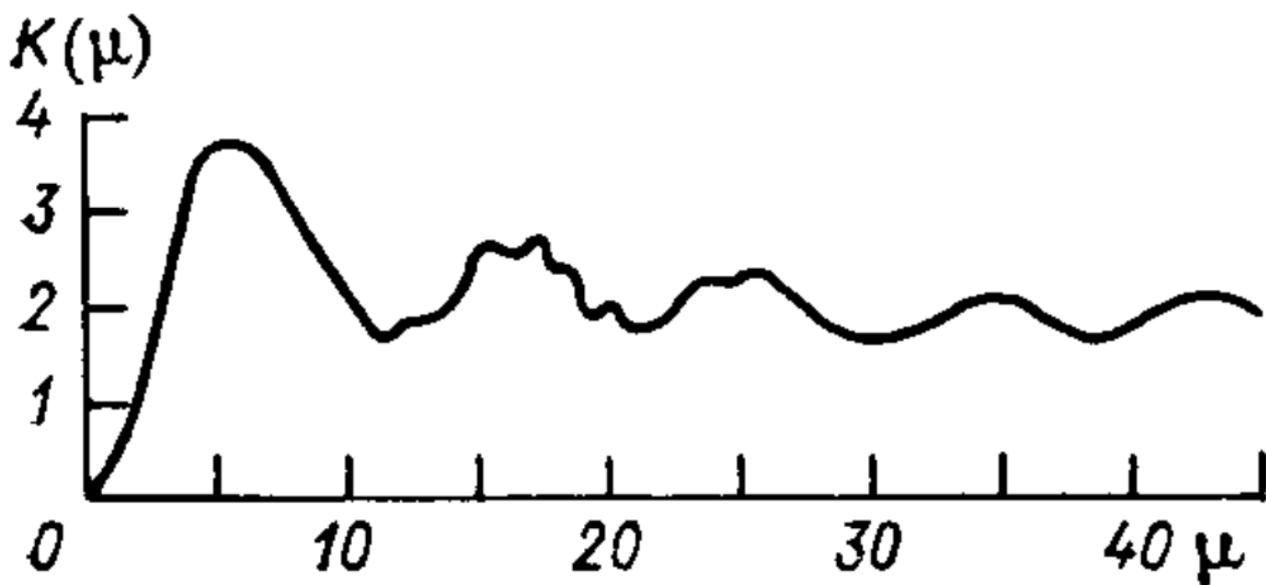


Рисунок 5 – График функции $K(\mu)$

Для значений $\mu \sim 6$, функция достигает максимума. Т. е., при равенстве радиуса частицы и длины волны существует резонанс. При $6 < \mu < 11$ для частицы радиусом r рассеяние увеличивается с ростом длины волны, что должно приводить к возникновению красного или желтого рассеянного света. При достижении больших μ , ослабевают колебания $K(\mu, m)$, от чего сильно ослабевает зависимость рассеяния от длины волны. Например, рассеиваясь, белый свет не изменит своего состояния и останется белым. Такое поведение характерно для облачных частиц.

Зная размеры облачных частиц ($0,3 < r < 0,4$ мкм), по анализу графика функции $K(\mu)$ делаем вывод, что солнечный свет рассеянный частицами облаков, имеет ослабленный красный конец спектра. Это и обуславливает их голубоватый или даже серебристый оттенок.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СПРАВКА И ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ

2.1. Описание волновых движений в атмосфере

Как известно из курса общей метеорологии, архимедова сила, действующая на частицы жидкости, выведенные из состояния статического равновесия, регистрируется в гравитационных волнах (более корректное название - волны плавучести; в русскоязычной литературе - внутренние гравитационные волны). Волна носит характер вертикально-поперечной, т. е. движение частиц осуществляется в плоскостях, параллельных вертикальной плоскости. Волновое движение сопровождается колебательным переходом потенциальной энергии в кинетическую (и кинетической в потенциальную). Рассмотрим случай, когда атмосфера есть несжимаемая жидкость, в которой существуют один над другим два однородных слоя с плотностями ρ_1 и ρ_2 . Слои разделены поверхностью разрыва плотности. В таком случае, получим уравнение для фазовой скорости волны плавучести:

$$c = \bar{u} \pm \sqrt{gH\left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}, \quad (17)$$

где \bar{u} – средняя скорость в нижележащем слое, H - осредненная высота поверхности разрыва плотности. Следует принять во внимание, что в верхнем слое $\bar{u} = 0$. Получим для высоты $1 < H < 10$ км, и при отношении плотностей в пределах $0,90 < \rho_2/\rho_1 < 0,99$ скорости гравитационной волны $c = 30 \dots 300$ км/ч.

Отметим малую зависимость скорости от амплитуды.

Напомним, что групповая скорость есть ни что иное, как приближенная скорость перемещения гребня негармонической волны, т. е. волны, отличной по форме от синусоидальной. Положим, что дисперсия поддерживает достаточно малое различие гармонических составляющих волны по частотам и фазовым скоростям. Тогда, групповая скорость может быть связана со средней фазовой скоростью \bar{c} составляющих волн формулой Релея:

$$C = \bar{c} - \lambda \frac{d\bar{c}}{d\lambda}, \quad (18)$$

где λ - длина волны.

Облачность генерируется в гребне волны, когда воздух достигает состояния насыщения (при достаточной влажности), совершая восходящие движения и охлаждаясь. Если рассматривать волны Кельвина-Гельмгольца, то необходимо смоделировать ситуацию, когда в атмосфере существуют один над другим два горизонтальных потока, разной температуры (плотности) и скорости. В нашем случае, примем за данное плоское движение двух несжимаемых воздушных потоков, бесконечно протяженных по вертикали. Введем обозначения для нижнего (с индексом 1) и верхнего (с индексом 2) потоков: T_1 , u_1 и T_2 , u_2 ($u_{1,2}$ – горизонтальные компоненты скорости). На поверхности раздела рассматриваемых потоков возникают волны. Теорию возникновения таких волн еще в 1890 г. выдвинул Г. Гельмгольц. Скорость их распространения вычисляется по формуле:

$$c = \frac{T_2 u_1 + T_1 u_2}{T_1 + T_2} \pm \sqrt{g \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 + T_2} \right) - T_1 T_2 \left(\frac{u_2 - u_1}{T_1 + T_2} \right)^2}. \quad (19)$$

Устойчивость волны (изменение ее амплитуды во времени) зависит от знака подкоренного выражения в выведенной формуле. Приравняем его нулю и выведем выражение для предельного значения $\lambda = \lambda^*$:

$$\lambda^* = \frac{2\pi T_1 T_2}{g} \frac{(u_2 - u_1)^2}{T_2^2 - T_1^2}. \quad (20)$$

Волны, чья длина волны превышает критическое значение ($\lambda > \lambda^*$), устойчивы, т. е. их амплитуда не меняется во времени. Более короткие волны являются неустойчивыми, и их амплитуда увеличивается с течением времени. Скорость распространения волн с $\lambda < \lambda^*$ вычисляется по формуле:

$$c^* = \frac{T_2 u_1 + T_1 u_2}{T_1 + T_2} \approx \frac{u_1 + u_2}{2}. \quad (21)$$

Введем обозначение $\frac{u_1 - u_2}{2} = u$. Тогда, на основании этого и выведенной выше формулы, получим формулу для длины гравитационной волны:

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} u^2 \frac{T_1 + T_2}{\sqrt{(T_2 - T_1)^2 + \beta \frac{u^2}{g} 2T_1 T_2 (4g - \beta u^2)}}, \quad (22)$$

где $\beta = \frac{d \ln \ln \theta}{dz} = \frac{\gamma_a + \frac{dT}{dz}}{T}$ – мера устойчивости слоев (порядок 10^{-5} м^{-1}). С увеличением β и ростом $T_2 - T_1$, длина волны λ убывает (т. к. $\beta u^2 \ll 4g$). Результаты вычислений, полученные на основании формулы (22) продемонстрированы в таблице 1. В случае равенства температур на двух уровнях, формула (22) описывает простые гравитационные колебания.

Таблица 1

Длина волн λ (м) при различных T_1 , T_2 , u и β

| № | T_1 , К | T_2 , К | u , m/s | γ , °C/100 m; β , м^{-1} | | |
|---|-----------|-----------|-----------|--|---------------------|----------------------------|
| | | | | 0,875; $4 \cdot 10^{-8}$ | 0,715; 10^{-5} | 0,45; $2 \cdot 10^{-5}$ |
| 1 | 263 | 265 | 10 | 8620 | 5910 | 4340 |
| 2 | 260 | 265 | 10 | 5580 | 4210 | 3730 |
| 3 | 263 | 265 | 5 | 3720 | 2520 | 1950 |

Полученные выводы можно трактовать иначе. Сдвиг (разрыв) скоростей ветра на поверхности раздела двух прилегающих друг к другу воздушных слоев обуславливает динамическую неустойчивость атмосферных волн. Волны всех длин на поверхности раздела со сдвигом ветра неустойчивы [3]. Однако, при условии, что помимо сдвига ветра существует разрыв плотностей, то неустойчивость сохраняется только для волн длиной меньше критической длины:

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{g} \rho_1 \rho_2 \frac{(u_1 - u_2)^2}{\rho_1^2 - \rho_2^2}. \quad (23)$$

Волны Гельмгольца в большинстве случаев являются динамически неустойчивыми, что приводит к их "захлестыванию", распаданию на ряд вихрей. Это приводит к новой форме движения, ячеековой циркуляции, которая не рассматривается в настоящей работе.

Сложная система волн, схематично изображенная на рисунке 6, образуется при обтекании гор и возвышенностей. В таком случае наблюдается чередование слоёв с восходящими и нисходящими вертикальными движениями (w).

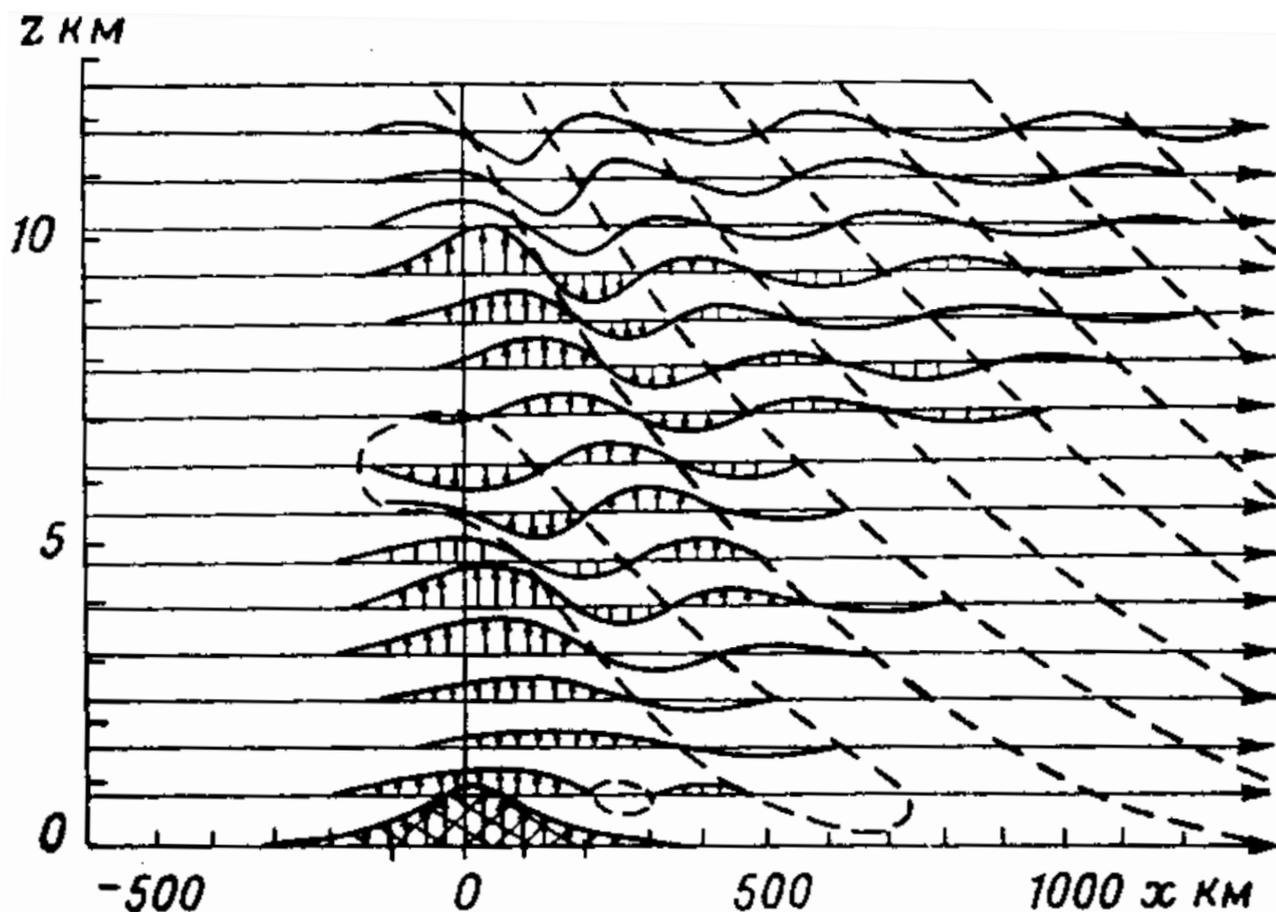


Рисунок 6 – Вертикальные профили линий тока при обтекании потоком горного хребта

Сущность воздействия горного препятствия на обтекающий его воздушный поток состоит в следующем. Когда поток встречается на своем пути препятствие, то с его подветренной стороны часто образуются волны довольно большой амплитуды. Для возникновения волн должны соблюдаться следующие условия: в слое толщиной 1-6 км направление ветра, перпендикулярно к горному хребту или составляет с направлением хребта угол не более $\sim 30^\circ$, при существующей устойчивой стратификации. Важную роль в формировании

потока с подветренной стороны играет величина и характер распределения скоростей ветра над препятствием. Ферхтогт выделил 4 типа воздушных течений. Рассмотрим лишь один из них, представляющий наибольший интерес для настоящей работы.

Скорость воздушного потока равна или превышает 8 м/с и увеличивается с высотой. Тогда образуются волновые течения за горным хребтом. Такие волны получили название "стоячих", т. к. их гребни не меняют своего местоположения на протяжении долгого времени, находясь на одном и том же месте по отношению к хребту. Как показано в [8], длина подветренных волн варьируется от 4 до 19 км, при этом за хребтом нередко отмечаются лишь один-два гребня. Амплитуда достигает 200-500 м, а обычное её значение 100-200 м.

Похожую природу имеют конвективные волны. Предполагается, что конвективный нагрев в облаках создаёт "препятствия" для потока в виде вертикальных вздутий изоэнтропических слоёв над конвективной областью. Волны генерируются потоком, обтекающим эти конвективные препятствия (аналогично орографическим волнам) [9].

Важным волновым параметром является околповерхностная горизонтальная фазовая скорость, c , которая формируется в источнике и считается постоянной. Различают "стоячие" ($c = 0$) и "нестационарные" ($c \neq 0$) волны плавучести.

Запишем двумерное линеаризованное уравнение для вертикальной скорости гравитационной волны (без учета силы Кориолиса, плотности, и горизонтального ветра $u(z)$):

$$\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial z^2} + (l^2 - k^2) \tilde{w} = 0, \quad (24)$$

где, $\tilde{w}(k, z, t)$ – разложенная в ряд Фурье вертикальная скорость $w(x, z, t)$ на высоте z ; $l^2(z) \approx \frac{N^2(z)}{[c-u(z)]^2}$, где $N(z)$ - частота Брента-Вайсяля; $k = 2\pi/\lambda_x$ - горизонтальное волновое число; λ_x - зональная длина волны. Как было отмечено выше, для стоячих орографических волн $c = 0$.

Сохранение горизонтального плотностного потока импульса (при отсутствии диссипации) присуще стоячим двумерным волнам. Для западно-ориентированных волн, это определяется как $\overline{\rho u' w'}$, где u' , w' – зональные и вертикальные возмущения скорости соответственно. Это условие было получено для орографических волн Элиассоном и Палмом, и позже переработано в теорему, названную по фамилиям этих двух ученых. Эта теорема применима к атмосферным волнам различных типов. Поток вектора Элиассона-Палма определяет волновую активность. Усредненное сопротивление всего потока, возбуждаемое рассеянием волны, характеризуется как сопротивление гравитационной волны и определяется дивергенцией потока Элиассона-Палма. Для безвихревых волн плавучести это условие можно записать в виде $\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \overline{\rho u' w'}$. Сопротивление гравитационных волн определяется путем оценки вертикальных градиентов потока импульса, порождаемых этими волнами.

На рисунке 7 схематично изображены процессы “рождения”, распространения и диссипации волн плавучести в атмосфере. Важно учитывать все стадии “жизненного цикла” волны: от “рождения” и “эволюции” до конечной стадии. В заголовке изображения даны пояснения к изображенным процессам и явлениям. Орографические и конвективные препятствия, а также струйные течения указаны, как источники волновой активности. Стоячие горные волны распространяются квазивертикально (как уже отмечалось выше), а нестационарные волны запускаются косо в атмосферу. Рассеяние волн происходит на различных участках пути их распространения. Чаще всего рассеяние отмечается при взаимодействии нескольких волн. Некоторые из подобных взаимодействий, наоборот, генерируют вторичные волны. Некоторые волны рассеиваются на сравнительно небольшом удалении от источника, а некоторые отражаются вертикально и рассеиваются (правая нижняя орографическая волна). При этом, тропосфера описана, как область зарождения,

стратосфера, как область распространения, а мезосфера, как область затухания волн.

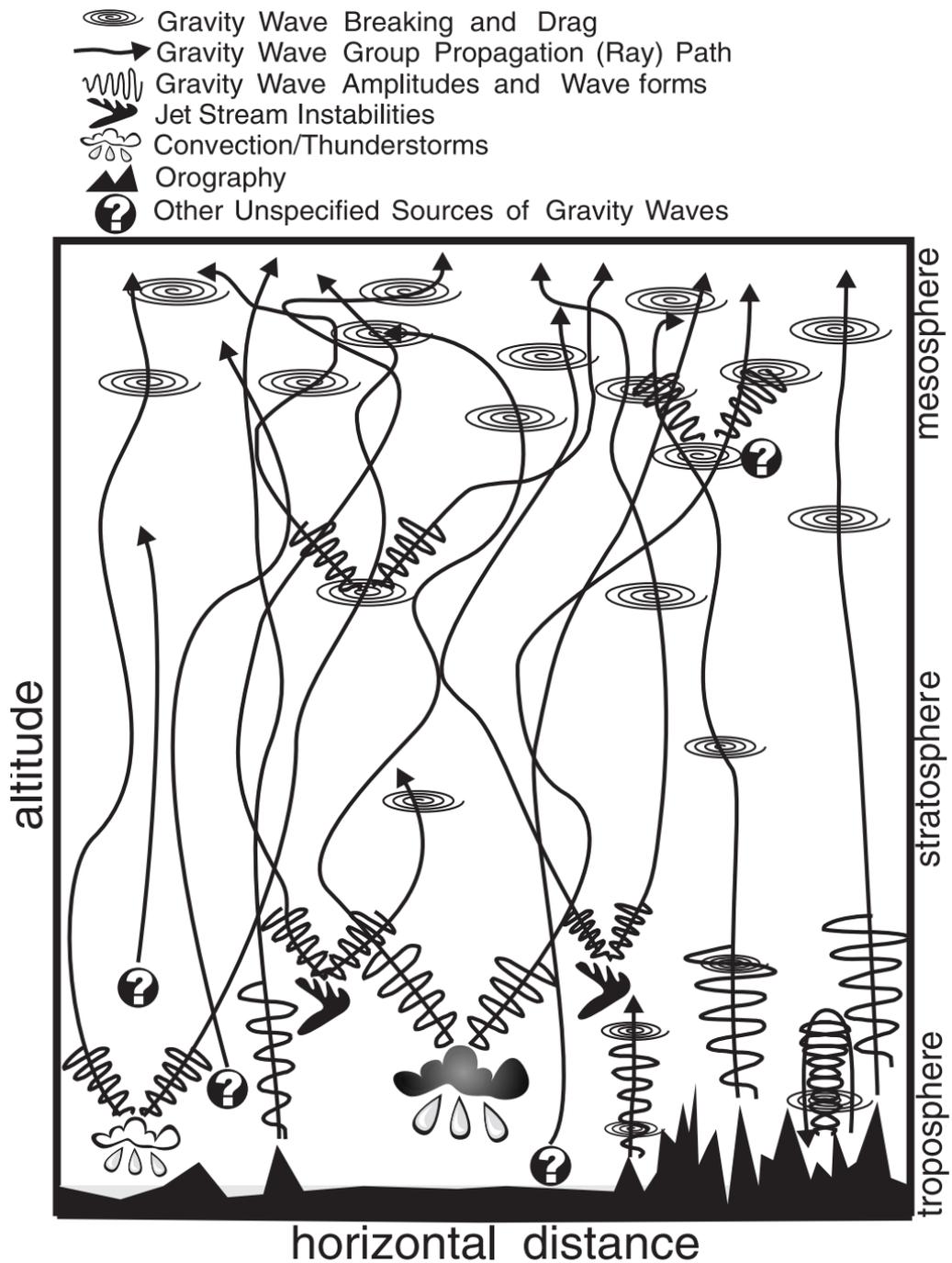


Рисунок 7 – Схематическое изображение распространения гравитационных волн в нижней и средней атмосфере

Рисунок 8 представляет собой фото, полученное автором настоящей работы, на котором отчетливо различим волновой отпечаток в перистом облаке.



Рисунок 8 – Сс up (облако перисто-кучевое волнистообразное), Вологодская область, 08/08/2022 15:00 ВСВ

Более детально теория волновых процессов атмосферы в настоящей работе не рассматривается. Здесь были приведены лишь необходимые для понимания сведения.

2.2. Описание инструментов для получения и работы с данными

Aura - спутник с около-полярной орбитой, высотой ~ 705 км. Он был запущен 07/15/2004. В результате вращения Земли, орбита спутника остается фиксированной относительно Солнца – это дает ежедневное глобальное покрытие практически всей поверхности земного шара (~ 15 витков в день). Aura является представителем группы А-спутников NASA, предназначенных для наблюдения за Землей (EOS).

EOS MLS (Microwave Limb Sounder) измеряет тепловое излучение в широких спектральных диапазонах, с центрами на 118, 190, 240, 640 и 2500 ГГц. Измерения происходят непрерывно, 24 часа в сутки 7 микроволновыми приемниками. MLS калибруется радиометрически, после каждого 25-секундного сканирования участка поверхности. MLS выполняет измерения состава атмосферы: температуры, водяного пара, химии, геопотенциала, - которые необходимы для (1) отслеживания стабильности стратосферного озонового слоя, (2) помощи в улучшении прогнозов изменения климата, (3) помощи в понимании общей циркуляции атмосферы [10]. Сканирование производится каждые 25 секунд от поверхности земли до высоты ~90 км, вдоль по направлению движения спутника Aura. Подробная информация представлена на официальном сайте исследовательской миссии: <http://eos-aura.gsfc.nasa.gov/>.

Данные MLS представлены в формате HDF. На рисунке 9 представлен пример распределения метеозадающих элементов (геопотенциальной высоты, температуры и содержания водяного пара) на изобарических поверхностях 0.0046 гПа (~82 км) и 0.0022 гПа (~85 км), соответствующих высотам мезопаузы, на которых образуются серебристые облака.

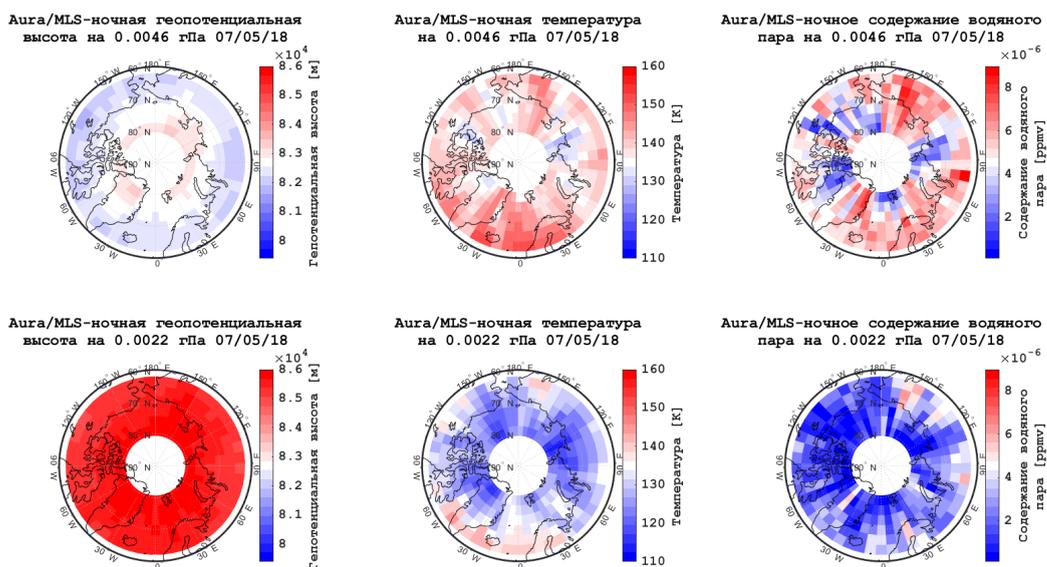


Рисунок 9 – Поля ночных метеовеличин, измеренных MLS: геопотенциальная высота (слева), температура (по центру) и содержание водяного пара (справа), -

07/05/18

Для оценки начала и конца сезонов серебристых облаков использовались данные альbedo облаков, измерения которого выполнены инструментом Cloud Imaging and Particle Size (CIPS), размещенном на борту спутника Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM), принадлежащему NASA. Спутник был запущен в 2007 году на 600-километровую солнечно-синхронную орбиту с целью наблюдения за серебристыми облаками. Второй рабочий инструмент спутника - Solar Occultation for Ice Experiment (SOFIE) (в настоящей работе не рассматривается), третий – CDE (Cosmic Dust Experiment). Данные AIM CIPS находятся в открытом доступе на официальном сайте Лаборатории атмосферной и космической физики (LASP): <http://lasp.colorado.edu/aim>.

CIPS это панорамный тепловизор, содержащий четыре камеры с суммарным углом обзора $120^\circ \times 80^\circ$ (~2000 км на ~1000 км). Принцип его работы основан на регистрации излучения мезосферных облаков и фоновой атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне, с центром на длине волны 265 нм. В течении лета делаются снимки широтного региона $40-85^\circ$ с. ш. с горизонтальным разрешением 25 км^2 [11]; в состав снимков входит облачное альbedo, содержание переохлажденной воды и размер частиц. Информация о размере облачных частиц получается за счет измерения фазовой функции рассеяния облаков, осуществляемого под семью различными углами рассеяния. Отдельные изображения за каждый совершенный виток (разделенные временным интервалом 95 минут) комбинируются в одно целое изображение. Каждый снимок охватывает 8000 км вдоль и 900 км поперек траектории витка.

Альbedo есть отношение рассеянного солнечного излучения к падающему.

В настоящей работе использованы данные CIPS версии 5.20, уровня 2, включающие в себя альbedo облаков. Разрешение сетки - 7,5 км.

Пример изображения полярных мезосферных облаков в канале альbedo, полученного инструментом CIPS за один виток, представлен на рисунке 10.

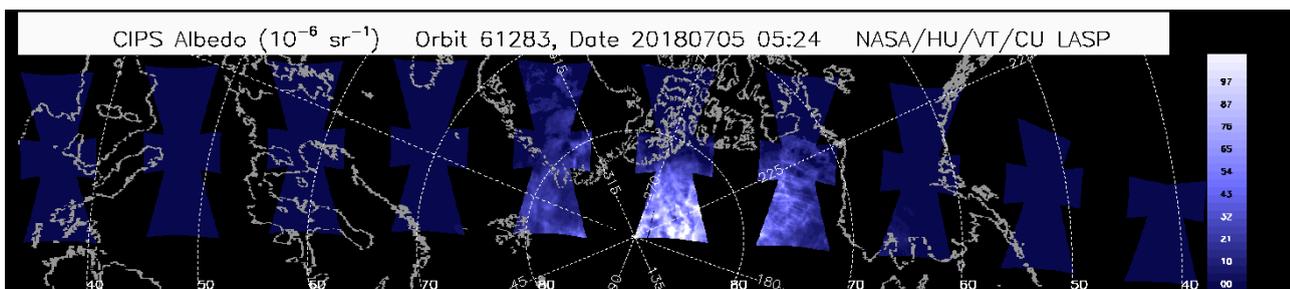


Рисунок 10 – CIPS альbedo, виток №61283, 5:24 ВCB, 07/05/18

3. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ СИГНАТУР В ПОЛЕ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ

3.1. Межгодовая изменчивость сезона серебристых облаков

По данным любительских наблюдений за серебристыми облаками в Северной Европе с 2008 по 2022 гг были построены временные ряды числа ночей с серебристыми облаками наблюдаемыми в Северной Европе. Границы Северной Европы – 25°W - 30°E, 50°N - 70°N. На рисунке 11.а показаны временные ряды числа ночей с серебристыми облаками за каждый летний месяц указанного периода времени. Красным цветом - временной ряд числа ночей для июня, черным - для июля, синим - для августа. Малое количество наблюдений в августе обусловлено окончанием сезона активности серебристых облаков и, следовательно, уменьшением количества числа ночей. Отсутствие данных в августе 2019 обусловлено, вероятно, столь малым количеством случаев наблюдения серебристых облаков, что никто из наблюдателей не посчитал необходимым внести наблюдения в архив.

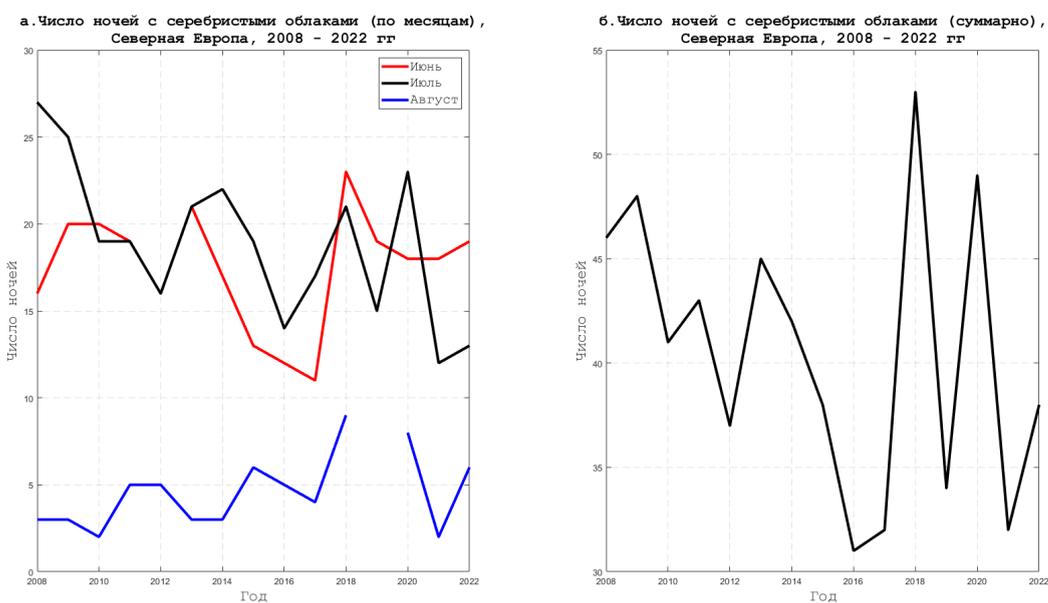


Рисунок 11 – Число ночей с серебристыми облаками над Северной Европой по месяцам (а) и суммарно за летний сезон (б)

На рисунке 11.б представлен временной ряд суммарного числа ночей с серебристыми облаками за весь летний сезон указанного периода времени. Видно, что этот параметр претерпевает существенные годовые вариации. Например, разница в числе ночей между 2016 и 2018 гг превышает 20 условных единиц. Временной ряд имеет два ярко выраженных экстремума - минимум в 2016 г и максимум в 2018 г. Далее в работе будут рассматриваться эти уникальные случаи.

Учет таких параметров, как даты начала и окончания, а также продолжительность сезонов активности полярных мезосферных облаков позволяет получить общее представление о состоянии атмосферы в области мезопаузы. На рисунке 12.а показаны дни появления первых облачных полей, зарегистрированных CIPS. Видно, что, как правило, это середина-конец мая.

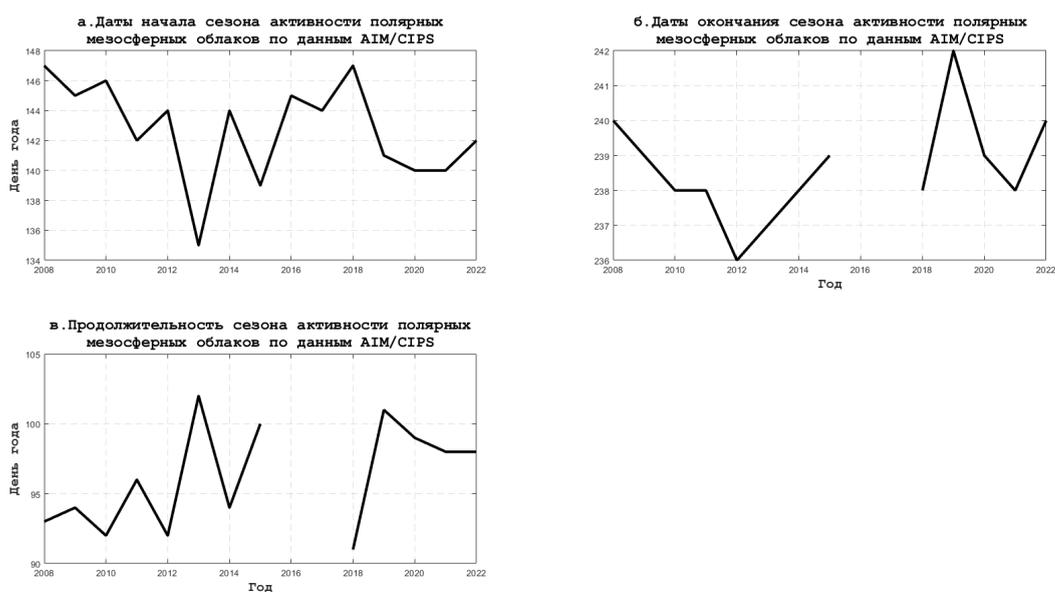


Рисунок 12 – Дни начала (а) сезона полярных мезосферных облаков, дни его окончания (б), продолжительность сезона (в)

На рисунке 12.б показаны дни существования последних облачных полей, зарегистрированных CIPS. Обычно это последние числа августа. Однако, следует учитывать, что первые и последние поля полярных мезосферных облаков слабо развиты и имеют малые горизонтальные размеры, из-за чего

наблюдение серебристых облаков невозможно. Апогея своего развития облачные поля достигают в первых числах-середине июня.

На рисунке 12.в представлен временной ряд продолжительности сезонов полярных мезосферных облаков.

Пробелы в данных в 2016-2017 гг связаны со сменой обреты спутником AIM, из-за чего снимки CIPS перестали охватывать Северное полушарие планеты и наблюдения прекратились.

Из рисунка 12.в видно, что чередуются пики. Исходя из этого, можно предположить, что в 2016 году продолжительность сезона была малой, в 2017 длинной. Однако, с 2019 года такое чередование перестает наблюдаться.

Как было показано ранее, в 2018-м году отмечалось наибольшее количество серебристых облаков, несмотря на то, что сезон полярных мезосферных облаков начался сравнительно поздно и имел одну из самую короткую продолжительность.

3.2. Временные ряды и вейвлет-анализ

Т. к. Aura - спутник на солнечно-синхронной орбите, измерения в приблизительно одной и той же точке производятся дважды в сутки - в дневное и ночное время. Отобрав измерения температуры и влажности на изобарической поверхности 0.0046 гПа для точек с координатами, удовлетворяющими границам Северной Европе, оставляются только ночные значения метеовеличин. Далее, все значения за каждые сутки осредняются и строится временной ряд за весь летний сезон.

На рисунке 13.а представлен временной ряд средних ночных значений для температуры (красный) и водяного пара (синий) для 2016 года, на рисунке 13.б - для 2018 года.

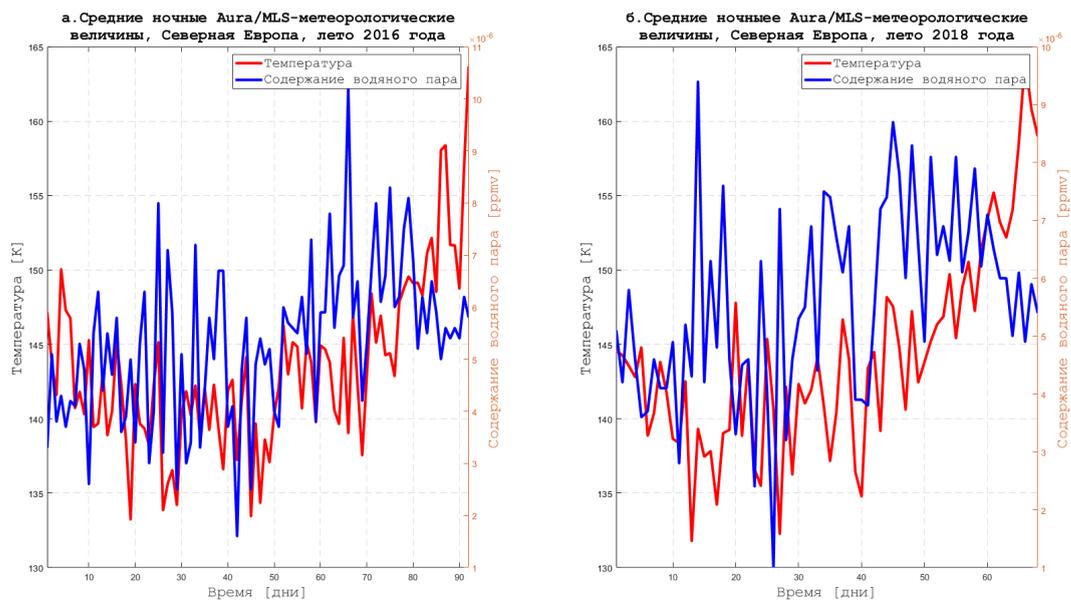


Рисунок 13 – Ночные средние значения температуры (красным) и водяного пара (синим) для 2016 г (а) и 2018 г (б)

Эти значения представляют собой одномерный сигнал, который подлежит вейвлет-анализу, чтобы оценить, какие волновые сигнатуры доминируют в изменчивости этих параметров.

В настоящей работе для вейвлет-анализа одномерных сигналов был использован достаточно распространенный вейвлет Морле.

Дискретность временных рядов равна суткам. Отсюда следует, что “видны” будут волны, периоды которых больше двух суток.

На следующих рисунках представлено вейвлет-преобразование временных рядов температуры и водяного пара, и соответствующие этим вейвлет-преобразованиям спектры мощности, осредненные по времени.

На рисунке 14 представлен анализ ряда температуры, на рисунке 15 – водяного пара для лета 2016 г.

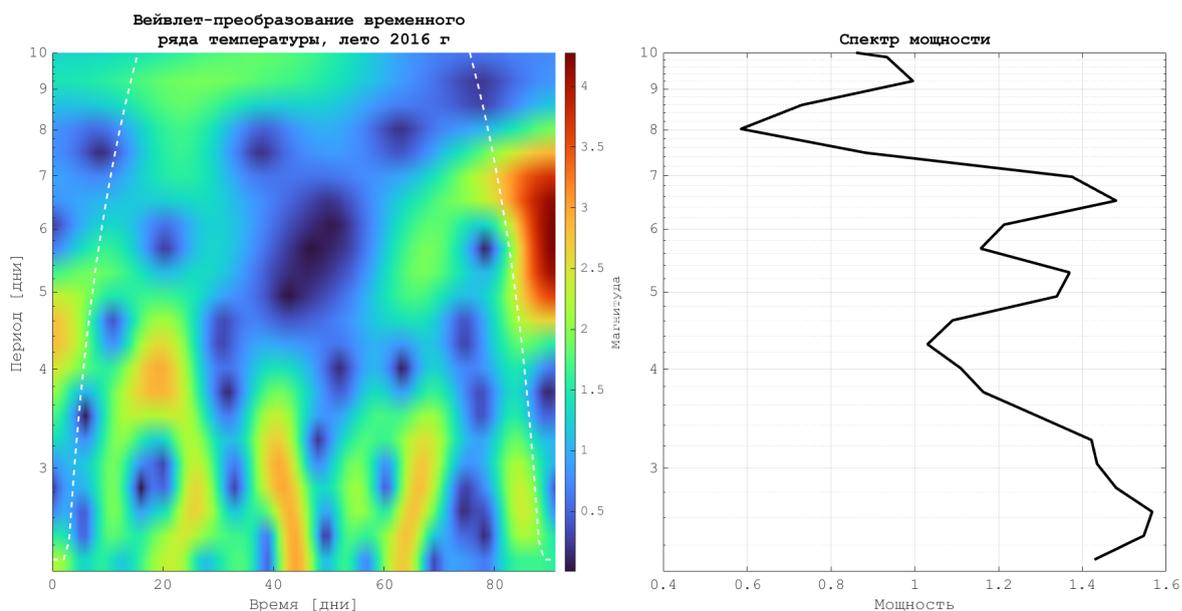


Рисунок 14 – Вейвлет-преобразование сигнала температуры, лето 2016 г

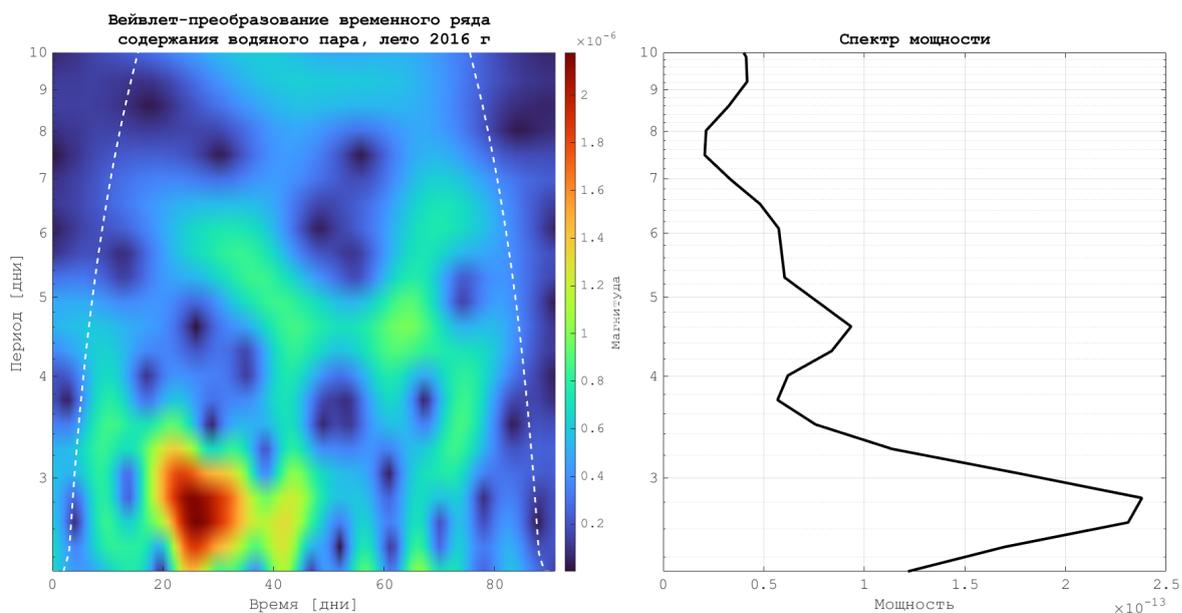


Рисунок 15 – Вейвлет-преобразование сигнала водяного пара, лето 2016 г

Исходя из полученных рисунков видно, что максимум мощности приходится на волну, имеющую период ~ 2 дня. Исходя из вейвлет-преобразования, видно, что наибольшие значения интенсивности (оранжевый) соответствуют периоду ~ 2 дня. Спектр мощности, осредненный за весь летний период, также указывает на это значение. Значит, можно сказать,

что именно квази-двухдневная волна вносит наибольший вклад в изменчивость этих параметров.

Можно заметить, что спектр мощности также имеет экстремумы в областях 5- и 7-дневной волны (темно-красная зона на вейвлете). Однако, этой информации не следует доверять, т. к. она лежит за пределами конуса влияния (белая пунктирная линия).

Аналогичные графики для 2018 г. На рисунке 16 представлен анализ ряда температуры, на рисунке 17 – водяного пара. Также видны максимумы в районе 2 дней (темно-красная зона), что говорит о вкладе волны с периодом ~ 2 дня в изменчивость метеовеличин.

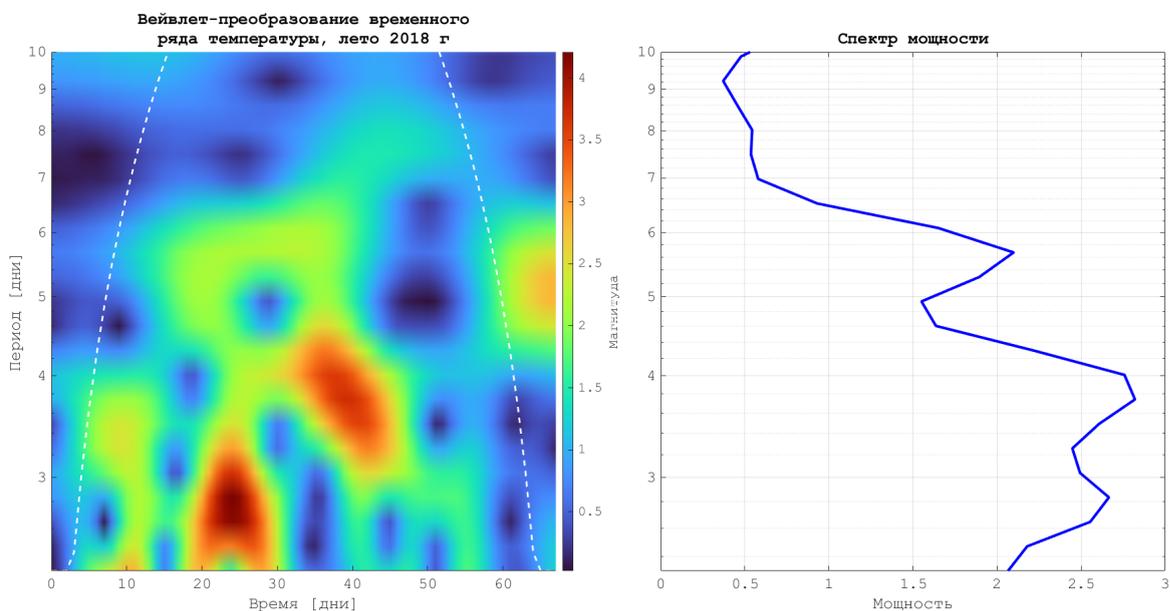


Рисунок 16 – Вейвлет-преобразование сигнала температуры, лето 2018 г

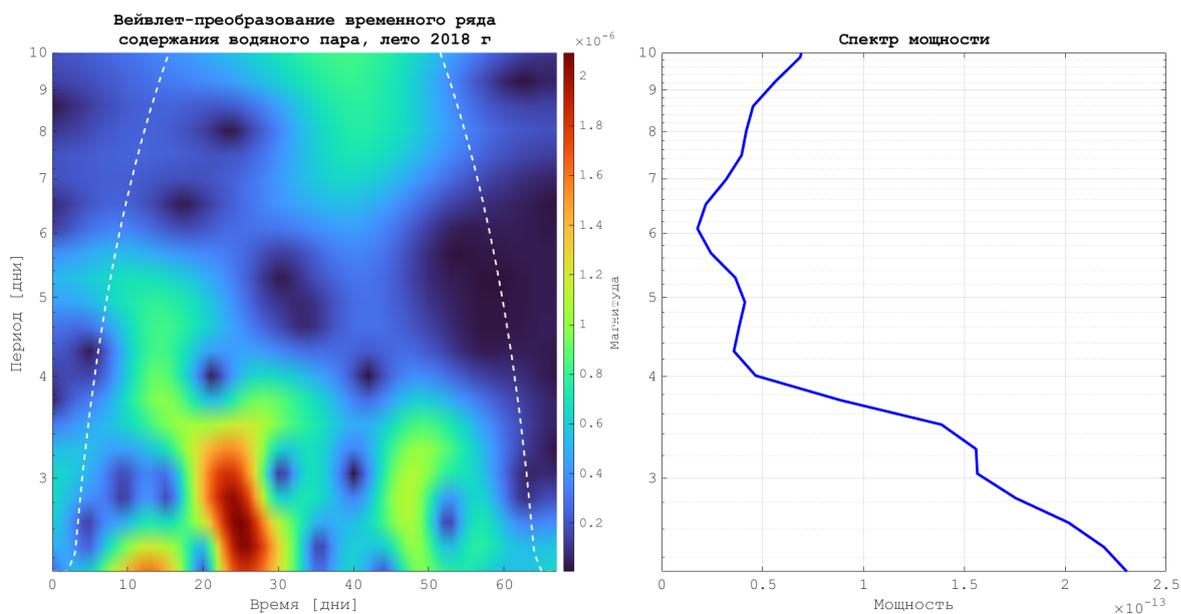


Рисунок 17 – Вейвлет-преобразование сигнала водяного пара, лето 2018 г

На вейвлет-преобразовании сигнала температуры существует максимум в районе 4 дней, который не прослеживается в сигнале водяного пара. Это может быть связано с тем, что имеются пропуски в измерениях. Важно обратить внимание, что в 2016 г данные MLS существуют для каждого дня (92) летнего сезона, а в 2016 г - всего лишь для 68 дней, что составляет 73% от полной продолжительности летнего сезона. Такие проблемы в данных могли вызвать артефакты в вейвлет-преобразовании сигнала температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серебристые облака были открыты более века назад и до сих пор привлекают к себе болезненное внимание многих ученых всего мира. На самом деле это уникальное явление. Помимо своей необычной природной красоты, они являются важным источником информации, помогающей понять суть динамических процессов в верхних слоях атмосферы, на высотах более 40 км.

Более трех десятилетий ученые активно изучают влияние динамических процессов в атмосфере на формы и структуры облачного поля в районе мезопаузы.

До сих пор верхние слои атмосферы до конца не изучены. Существует множество гипотез о различных условиях возникновения того или иного процесса. Благодаря серебристым облакам ученые могут своими глазами наблюдать за этими процессами, не прибегая к использованию сложных измерительных приборов. Ведь в некоторых случаях для наблюдения трансформации облачного поля может быть достаточно простой фотокамеры, способной делать качественные фотографии сумеречного неба.

Понимание процессов средней атмосферы позволит лучше понять особенности атмосферной циркуляции, влияние космического пространства на земную атмосферу, а также позволит составить более четкое представление о многолетних режимах метеорологических элементов в верхней атмосфере.

В результате проделанной работы, были решены следующие задачи:

1. По записям наблюдений за серебристыми облаками, составлен архив числа ночей с серебристыми облаками в Северной Европе за летние месяцы с 2008 по 2022 года
2. На основании составленного архива, выявлены года, в которые наблюдалось наибольшее (2018) и наименьшее (2016) количество ночей с серебристыми облаками
3. По результатам спутниковых измерений (AIM/CIPS), составлен архив дат начала, окончания и продолжительности сезонов активности серебристых

облаков за 15 лет, для конкретных годов получены временные ряды температуры и водяного пара (Aura/MLS)

4. Выполнен вейвлет-анализ временных рядов и выявлены волновые сигнатуры

Квази-двухдневная волна вносит наибольший вклад в изменчивость полей температуры и водяного пара в мезопаузе. В 2018 году мощность квази-двухдневной волны оказалась выше, чем в 2016 г. Это обуславливает общее число ночей с серебристыми облаками, наблюдаемыми над Северной Европой в эти года. Т. е. вследствие активности квази-двухдневной волны большей мощности (по сравнению с 2016 г), продолжительность сезона серебристых облаков оказалась выше в 2018 г. Это хорошо согласуется с ранними исследованиями квази-двухдневной волны, которые показали, что максимум ее активности наблюдается в летней мезопаузе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бронштэн В. Серебристые облака и их наблюдение. Москва. наука. 1984. – 128 с.
2. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Ленинград. Гидрометеиздат. 1984. – 753 с.
3. Хромов С., Мамонтова Л. Метеорологический словарь. Ленинград. гидрометеиздат. 1974. – 569 с.
4. Hines, C. A. (1968), Possible source of waves in Noctilucent Clouds. Dept. of Physics, University of Toronto, Canada. – 6 с.
5. Шевчук Н. О., Погорельцев А. И., гаврилов Н. М. Эффективность генерации внутренних гравитационных волн от локализованного по высоте тропосферного источника. Ученые записки РГГМУ. doi: 10.33933/2074-2762-2019-54-16-27 – 12 с.
6. Dalin, P., et al. (2015), Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a tropospheric occluded front, Geophys. Res. Lett., 42, 2037–2046, doi:10.1002/2014GL062776 – 10 с.
7. Pertsev, N., Dalin P. Noctilucent clouds observed from the ground: sensitivity to mesospheric parameters and long-term time series. Pertsev et al. Earth, Planets and Space 2014, 66:98. – 9 с.
8. Пчелко И. Г.. Авиационная метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1963. - 348 с.
9. Eckermann, S. et al. An Overview of the Past, Present and Future of Gravity-Wave Drag Parametrization for Numerical Climate and Weather Prediction Models. ATMOSPHERE-OCEAN 41 (1) 2003, 65–98. – 35 с.
10. Waters, J. W. et al. (2005), An overview of the EOS MLS experiment. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology – 67 с.
11. Thuraiajah et al. Characteristics of a mesospheric front observed in Polar Mesospheric Cloud fields. Contents lists available at ScienceDirect Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics journal homepage:

- www.elsevier.com/locate/jastp <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105627>. – 8 c.
12. Broman, L, Thurairajah, B, Benze, S, Christensen, OM and Gumbel, J. (2022). Case Study of a Large Mesospheric Front in Polar Mesospheric Clouds. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 74(2022), 85–105. DOI: <https://doi.org/10.16993/tellusa.31> – 21 c.
 13. Baumgarten, G., et al., and D. C. Fritts (2014), Quantifying Kelvin-Helmholtz instability dynamics observed in noctilucent clouds, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 9324–9337, doi:10.1002/2014JD021832. – 14 c.
 14. Dalin, P. et al. First common volume ground-based and space measurements of the mesospheric front in noctilucent clouds. *Geophysical Research Letters*, VOL. 40, 6399–6404, doi:10.1002/2013GL058553, 2013. – 6 c.
 15. Dalin, P., et al. (2016), A case study of long gravity wave crests in noctilucent clouds and their origin in the upper tropospheric jet stream, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2016JD025422. – 15 c.
 16. Dalin, P. et al. (2021), What caused the frequent and widespread occurrences of noctilucent clouds at middle latitudes in 2020? <https://doi.org/10.5194/angeo-2021-28>. – 30 c.
 17. E. Merzlyakov and Ch. Jacobi (2004). Some numerical results on the quasi-two-day wave excitation and propagation in the unstable summer middle atmosphere. DOI: 10.5194/angeo-22-1917-2004 – 16 c.
 18. He, M., Chau, J. L., Forbes, J. M., Zhang, X., Englert, C. R., Harding, B. J., et al. (2021). Quasi-2-day wave in lowlatitude atmospheric winds as viewed from the ground and space during January–March, 2020. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093466. <https://doi.org/10.1029/2021GL093466> – 11 c.
 19. Megner, L., Christensen, O. M., Karlsson, B., Benze, S., & Fomichev, V. I. (2016). Comparison of retrieved Noctilucent cloud particle properties from Odin tomography scans and model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016. doi:10.5194/acp-2016-22. – 27 c.

20. Thurairajah et al. Characteristics of a mesospheric front observed in Polar Mesospheric Cloud fields. Contents lists available at ScienceDirect Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics journal homepage: www.elsevier.com/locate/jastp <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105627>. – 8 c.