



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

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (магистерская диссертация)

На тему: «Исследование условий формирования и развития серебристых облаков»

Исполнитель Дмитриева Маргарита Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Кашлева Лариса Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой 
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Сероухова Ольга Станиславовна
(фамилия, имя, отчество)

«16» февраля 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Природа и общие сведения о серебристых облаках	12
§1.1. Физические процессы в мезосфере	12
§1.2. Физические параметры С.О.	18
§1.3. Микроструктура С.О.	23
§1.4. Гипотезы происхождения С.О.	26
Глава 2. Методика изучения С.О.	29
§2.1. Визуальный метод	29
§2.2. Ракетный метод	30
§2.3. Радиозондирование атмосферы и спутниковая съемка	30
§2.4. Эмпирические модели атмосферы	32
Глава 3. Анализ процессов формирования и разрушения элементов микроструктуры С.О. Практическая проверка гипотезы Ошибка! Закладка не определена.	
§3.1. Процесс ионизации верхней атмосферы	34
§3.2. Конденсация вод. пара в мезосфере	41
§3.3. Расчеты высотных профилей температуры	42
§3.4. Сопоставление данных	60
Заключение	61
Список источников	65

Введение

Выпускная квалификационная работа содержит 68 страниц, 20 рисунков, 6 таблиц, 50 использованных источников.

Ключевые слова: мезопауза, процессы в мезосфере, серебристые облака, обводнение заряженных ядер конденсации, газо-пылевые частицы, ледяные частицы, ионизация, солнечная активность, индекс $F_{10.7}$, температурные графики.

Актуальность изучения темы серебристых облаков (далее – С.О.), представленной в данной работе, состоит в необходимости понимания атмосферных процессов, происходящих на высотах мезосферы и мезопаузы, важности изучения взаимосвязи процессов ионизации в верхней атмосфере с наблюдаемыми изменениями погодных условий в более низких слоях атмосферы и в барическом поле тропосферы, а также во взаимовлиянии этих процессов в атмосфере Земли и важности их дальнейшего изучения.

Новизна представленного метода состоит в изучении корреляции мощности солнечных вспышек и увеличения поля С.О. в связи с увеличением количества заряженных частиц ядер конденсации, а также в применении формулы Томсона для расчета зависимости упругости насыщения от кривизны и электрических зарядов капель.

Объектом исследования является тенденция роста и уменьшения поля С.О. в зависимости от влияния солнечных вспышек, выявление дат их совпадения и проверка в эти даты изменения барического поля тропосферы.

Предметом исследования являются спутниковые снимки поля С.О., полученные аппаратами NASA (AIM), спектрометра MAARSY, графики изменений уровней индексов солнечной активности по данным сайта космической погоды Meteoweb.ru, карты барической топографии на высотах AT-100, AT-300, AT-500 по данным метеорологической программы Е.В. Дорофеева «Синоптик-прогнозист».

Цель работы – выяснить наличие или отсутствие корреляции мощности солнечных вспышек и увеличения поля С.О., а также наличие или

отсутствие изменений барического поля тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500 ввиду увеличения солнечной активности и разрастания поля С.О. Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести обзор теории и практики изучения области мезосферы и мезопаузы и особенностей появления и развития С.О. на основе российских и зарубежных источников.

2. Провести сравнительный анализ зависимости солнечных вспышек и увеличения поля С.О. по данным спутниковых снимков NASA (AIM), а также наличия или отсутствия изменений барического поля тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500 по датам, соответствующим появлению крупных солнечных вспышек и последующему скачкообразному разрастанию поля С.О.

3. Провести для мезосферы расчет зависимости упругости давления насыщения от кривизны и электрических зарядов капель.

3. Провести графическую обработку и анализ экспериментальных данных температуры разных высот мезосферы и мезопаузы, полученных при работе с эмпирической моделью атмосферы NRLMSISE-00 для выявления тенденции температурных изменений и высотного диапазона образования С.О.

Методы исследования. В работе использовались данные температуры разных высот мезосферы и мезопаузы, полученные с помощью эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00 для выявления высотного диапазона образования С.О., методы поиска и сравнения данных спутниковых снимков поля С.О. за летний период 2021 г. по широте города Апатиты Мурманской области, данных карт барической топографии метеорологической программы Е.В. Дорофеева «Синоптик-прогнозист» и последующий анализ изменений поля С.О. и барического поля тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500.

Описание модели NRLMSISE-00 [26] – это эмпирическая глобальная эталонная модель атмосферы Земли, учитывающая полное расстояние от

земли до космоса, которая моделирует и вычисляет температуру и плотность компонентов атмосферы: параметры нейтральной температуры, температуру в экзосфере, плотности He, O, N₂, O₂, Ar, H, N и общую массовую плотность. Модель основана на данных наземных радаров, спутниковой и ракетной съемки [42]. Основное использование этой модели состоит в том, чтобы рассчитывать изменения орбиты спутника из-за ее отклонения вследствие влияния атмосферы Земли. Модель подразумевает использование данных геомагнитной и солнечной активности. Индексы являются количественной мерой геомагнитной активности и предназначены для описания вариаций магнитного поля Земли, вызванных воздействием потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменениями внутри магнитосферы и взаимодействием магнитосферы и ионосферы. Каждый из индексов вычисляется по результатам измерений и характеризует только часть сложной картины солнечной и геомагнитной активности. В работе были использованы данные Кр-индекса, Ap-индекса, а также индекса F_{10.7}.

Описание программы «Синоптик-прогнозист» [46] – программа предназначена для подготовки, контроля и управления текущей, прогнозной и экстренной информацией о гидрометеорологической обстановке над территорией Российской Федерации. При этом программа обладает широким спектром вариантов визуализации оперативной синоптической информации в виде карт приземной погоды в кодах FM 12–XII SYNOP, BUFR-SYNOP, FM 13–XII SHIP, FM 15–XIII METAR, 16–XIII SPECI, данных штормовых сообщений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды в коде WAREP, данных температурно-ветрового аэрологического зондирования атмосферы в коде КН-04 (FM 35–XI TEMP), данных метеорологических радиолокаторов в коде BUFR, а также данных прогностических центров в кодах GRID, GRIB (FM 47–IX GRID). Информация предоставлена отделом ОРМИ ФГБУ ГГО им. А.И. Воейкова.

Степень внедрения. В результате проведенного исследования продемонстрирована возможность изучения скачкообразного увеличения

поля С.О. под влиянием солнечных вспышек, а также проведена попытка обнаружения связи этих изменений с изменениями барического поля тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500.

Область применения: исследования процессов в средней и верхней атмосфере.

Практическая значимость работы. Результаты проведенного исследования могут быть полезны для дальнейшего изучения влияния солнечной активности на процесс ионизации верхних слоев атмосферы Земли, ионизации и электризации частиц, выступающих в качестве ядер конденсации в области мезосферы и мезопаузы, связь солнечной активности с тенденцией скачкообразного увеличения поля С.О., а также для изучения степеней корреляции вышеописанного процесса и изменениями барического поля тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500.

В первой главе данной работы рассматриваются общие сведения о физической и химической природе серебристых облаков, а также основные существующие гипотезы их возникновения.

Во второй главе данной работы представлен краткий обзор методов изучения С.О., применимых к целям и задачам данной работы.

В третьей главе проводится анализ процессов формирования и разрушения физико-химических элементов микроструктуры С.О., приводятся расчеты высотных профилей температуры мезосферы и мезопаузы за летний период 2021 г. по датам солнечных вспышек, соответствующим скачкообразному увеличению поля и плотности С.О. по данным эмпирической глобальной эталонной модели атмосферы Земли NRLMSISE-00 [26], практическая проверка гипотезы о взаимном влиянии изменений поля С.О. и барической тропосферной топографии – сопоставление данных (2021 г.)

В четвертой главе содержатся общие выводы по проведенному исследованию.

Необходимо дать определения основным понятиям, применяемым в магистерской работе.

С.О. – серебристые облака

В.А. – верхняя атмосфера

С.А. – солнечная активность

АГВ – атмосферные гравитационные волны

ОЦА – общая циркуляция атмосферы

Индекс $F_{10.7}$ – единица измерения потока солнечного излучения на длине волны 10.7 нм.

Ар-индекс – индекс, характеризующий среднесуточную планетарную амплитуду возмущения геомагнитного поля Земли, и включающий в себя 8 значений наиболее возмущенных элементов магнитного поля за день. Индекс из группы планетарных индексов, характеризующих геомагнитную активность на планете Земля.

Кр-индекс – среднее значение уровней возмущения геомагнитной обстановки, наблюдаемых на 13 мировых станциях, расположенных между 48° и 63° северной и южной геомагнитных широт. Индекс из группы планетарных индексов, характеризующих геомагнитную активность на планете Земля.

Постоянная Планка – суммарная мощность солнечного излучения, равная 1367 Вт/м^2 .

Оптическая плотность облака – это степень ослабления в облаке видимого света [48].

Кюри – единица активности радиоактивного изотопа: количество радиоактивного вещества, дающего 3.7×10^{10} актов распада/с [48].

Легкие ионы – ионы, состоящие из поляризованных атомов [4].

Тяжелые ионы – ионы, присоединившие мельчайшие ядра конденсации и передавшие им свой заряд [4].

Синглетный кислород — общее название для двух возбужденных состояний молекулярного кислорода с более высокой энергией, чем в основном состоянии.

Мировой центр данных по Солнечно-Земной физике – Геофизический центр Российской Академии Наук.

МСВА – нелинейная модель средней и верхней атмосферы.

NRLMSIS-00 – эмпирическая модель атмосферы Земли. Для применения в работе модели NRLMSIS-00 значение индекса солнечной активности F10.7 округляется до целых значений [26].

PMC – polar mesospheric clouds

NLC – noctilument clouds

LIDAR – Light Identification, Detection and Ranging

GOES – комплекс программ для развертывания и эксплуатации спутников.

NOAA – научная организация в содружестве с НАТО, проводит комплексные исследования Земли из космоса.

AIM – американский космический аппарат The Aeronomy of Ice in the Mesosphere.

SCIAMACHY – спутниковый спектрометр SCanning Imaging Absorbtion spectroMeter for Atmospheric CHartographY.

VarSITI – американский аппарат Variability of the Sun and its terrestrial impact.

UARS – Upper Atmosphere Research Satellite, спутник для исследования атмосферы Земли

NDMC – Network for the Detection of Mesopause Change, программа изучения атмосферы с 2007 г.

SCOSTEP – The Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics.

CAWSES-II – Climate And Weather of the Sun-Earth System, программа по изучению погоды и климата с 2009-2013 гг. Была организована и проведена под руководством Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics.

Изучением условий образования, морфологической структуры и химического состава мезосферных облаков занимались и продолжают заниматься ученые разных стран мира начиная с 1883 г. – официального года их появления, когда, после извержения вулкана Кракатау они наблюдались по всему северному полушарию в области умеренных и приполярных широт. Явление стали изучать европейские астрономы Отто Йессе, Томас Уильям Бэкхаус и Вацлав Ласка. В России наибольший вклад в изучение данного явления внес Витольд Карлович Цераский, который с достаточной точностью визуально установил высоту облаков (около 75 верст) и их малую оптическую плотность.

Отто Йессе также проводил подобные измерения, однако, с несколько меньшей точностью, но именно он предложил закрепившееся научное название мезосферных облаков — «серебристые облака» (далее С.О.). В современных англоязычных источниках действует название noctilument clouds (NLC) или polar mesospheric clouds (PMC, NASA) [20].

В середине XX столетия исследования С.О. проводил крупный советский ученый В.А. Бронштейн. Он впервые подробно изучил и описал вероятные условия появления и волновую структуру С.О. Благодаря проведению им многолетних исследований было выявлено, что под С.О. в приземном слое атмосферы наблюдался интенсивный рост давления. Было зафиксировано периодическое появление С.О. над тыловой частью антициклона, в результате чего отмечалась «временная пульсация областей высокого давления в сторону местности, над которой образовывались облака» [1, с. 60].

В.А. Бронштейном была выявлена и зафиксирована определенная закономерность – чем выше была динамическая активность пограничного слоя атмосферы, тем разнообразнее была форма серебристых облаков, увеличивалась яркость и площадь их распространения [1]. Он считал целесообразным рассматривать некую зависимость появления и изменения

структуры поля С.О. от волновых проявлений, возникающих вследствие изменения и роста мощности тропосферных барических образований.

Следует заметить, что данные выводы были сделаны в середине XX столетия, при наличии аппаратуры и методами исследований, отвечающих тому времени. Сегодня научные методы позволяют проверить выводы В.А. Бронштейна с большей точностью с помощью современных наземных и спутниковых средств наблюдения [20], что является одной из задач данной работы.

Вопросы условий формирования и микрофизической структуры С.О. ставились в науке неоднократно. В середине XX века регулярно проходили международные научные мероприятия, направленные на обмен опытом и изучение метеорологических особенностей различных явлений нижней и верхней атмосферы. Так, с 1957 г по 1967 г. по программе Международного геофизического года, проходили регулярные наблюдения С.О. [1]. На протяжении 2,5 месяцев летнего времени 1965 года советским ученым М.И. Буровым в 332 точках был проведен ряд наблюдений диапазона высот возникновения С.О. Согласно полученным данным, диапазон высот располагался от 60 до 118 км. При этом уже было известно, что слой С.О. состоит из нескольких облачных слоев, располагается на разных высотах мезосферы и мезопаузы и имеет большую вертикальную протяженность [1], что было подтверждено исследованиями начала XXI века [3], [6-8]. Также на протяжении XX века были высказаны и частично проверены гипотезы появления ядер конденсации на высотах верхней мезосферы и мезопаузы, и образования облачных ледяных капель [20].

Современные исследования, благодаря ряду научных программ спутниковых наблюдений, проводимых в 2002-2007 годах американским аппаратом AIM, спутниковым спектрометром SCIAMACHY [22] и рядом других аппаратов установили, что в летний период мезосферные облака находятся на границе мезосферы и мезопаузы на высотах 80-110 км в области

приполярных широт постоянно. Облачные частицы образуются на данных высотах примерно в течение 3-4 месяцев – с мая по сентябрь.

Было выявлено, что голубовато-белая пелена волнистых мезосферных облаков, наблюдаемых с земной поверхности – это лишь видимая часть огромного слоя с весьма низкой оптической плотностью, согласно рабочей гипотезе, состоящего из мельчайших облачно-ледяных частиц и расположенного на разных высотных уровнях внутри слоя мезосферы. Пик их появления приходится на середину летнего времени – на конец июня-начало июля, примерно за 3-4 недели до наступления периода летнего солнцестояния (19-25 июня). При этом частота их появления будет нарастать примерно в районе 15-20 дней перед и после наступления летнего солнцестояния (21-22 июня) [20].

Долгое время, на протяжении конца XIX-начала XXI веков изучалась вероятность влияния солнечной активности (СА) на частоту появления С.О. До проведения работ в 1967 г. советского ученого Васильева, эта связь считалась не подтвержденной. Васильев получил данные о количестве ночей и пике появления С.О. в Европейской части СССР, соответствующих 11-летнему солнечному циклу, что позволило в дальнейшем проводить более точные исследования в этой области. В исследованиях Васильев опирался на данные «числа Вольфа», сегодня эти показатели заменяют индексы солнечной активности A_p , K_p и $F_{10.7}$.

Сегодня показатели индексов солнечной активности, как и спектральные спутниковые снимки поля С.О., в основном, находятся в открытом доступе, и могут быть использованы в научной работе. В рамках данной работы планируется проверка гипотезы о наличии статистической зависимости интенсивности роста поля С.О. с интенсивностью солнечного излучения.

В настоящее время исследования областей верхней и средней атмосферы и мезосферных процессов продолжаются и имеют большое практическое значение. С начала 2000-х годов XXI века было создано и

проведено несколько крупных исследовательских программ – NDMC и CAWSES-II, недавно была начата новая международная программа VarSITI [38].

Глава 1. Природа и общие сведения о серебристых облаках

§1.1. Физические процессы в мезосфере

Область атмосферы выше 50 км от поверхности Земли, мезосферу, принято относить к верхней атмосфере. В основном это связано с тем, что для в.а. характерны масштабные волновые процессы с участием гравитационных волн с периодами колебаний в несколько часов и длиной в несколько сотен км, планетарных волн (волны Россби) с периодами колебаний 5, 10 и 16 дней, атмосферных и лунных приливов и отливов, а также процессы активной ионизации молекул и атомов воздуха под воздействием коротковолнового УФ-излучения Солнца длиной <200 нм.

Планетарные волны (волны Россби) образуются в стратосфере и мезосфере в результате колебаний в барическом поле средней и верхней тропосферы (формирование циклонов, гребни и ложбины, землетрясений, извержений вулканов, орографии) и оказывают влияние на С.О. Установлено, что на высоте 80-110 км амплитуды полусуточных приливных колебаний значительно усиливаются, что с большой вероятностью оказывает влияние на область верхней мезосферы и мезопаузы.

В летний сезон проникновение стационарных планетарных волн в страто- и мезосферу в значительной степени блокируется ветрами восточных направлений, что также связано с формированием в летней мезосфере циркумполярного вихря [9].

Перемещение воздушных течений в обоих полушариях во многом связано с воздействием гравитационных волн. Их влияние касается взаимодействия с основным восточно-западным потоком воздуха в области летней мезосферы, а также с переносом туда энергии и импульса. Согласно данным многолетних исследований ракетного и радарного зондирования области верхней мезосферы и мезопаузы, процессы наиболее активного образования водяного пара происходят преимущественно в летний период, при значительном понижении температуры. Этот процесс также связан с

движением гравитационных волн и процессами ОЦА, а именно с переносом влажного теплого воздуха из нагретой постоянным усиленным потоком солнечного излучения континентальной тропосферы северного полушария с восходящими потоками в верхние слои атмосферы на высоту 60-90 км. Подъем теплого влажного воздуха в область полярной мезосферы и мезопаузы летнего полушария приводит к ее охлаждению до экстремально низких температур. Потоки влажного воздуха проходят через полярную мезосферу летнего полушария через экватор в полярную область зимнего полушария, способствуя ее нагреву. При смене сезонов этот процесс работает и в обратном порядке [24].

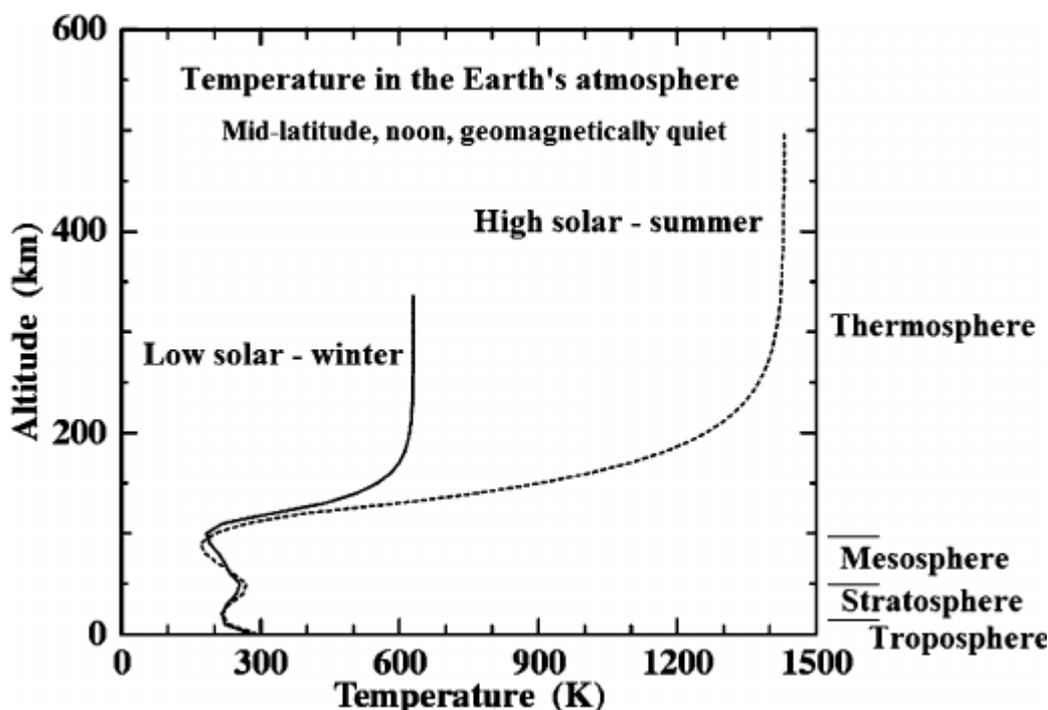


Рис.1. Температурные профили атмосферы в средних широтах при отсутствии геомагнитных возмущений в зимний и летний период по данным эмпирической модели атмосферы Земли NRLMSISE-00 [26].

Волновые процессы в средней и верхней атмосфере сегодня являются предметом изучения многих мировых научных метеорологических и геофизических организаций. Их влияние на волновую структуру С.О. имеет статистическую регулярность и продолжает изучаться спутниковыми и наземными измерительными методами.

Для мезосферы характерен как молекулярный, так и атомарный газовый состав. Физические условия существенно отличаются от тропосферных и термосферных, создавая слой с определенными физическими особенностями. Масса атмосферы на высотах выше 50 км составляет менее 1г над каждым см², что не превышает 0,0001 доли общей массы атмосферы. Число частиц в 1 см³ = $2,7 \cdot 10^{19}$ на уровне моря, на высоте 50 км убывает до $2 \cdot 10^{16}$. Особенно быстро происходит с высотой уменьшение концентрации нейтральных частиц [15].

Химический состав области верхней мезосферы и мезопаузы, вследствие происходящих в них атмосферных процессов, весьма неоднороден. Помимо молекул и атомов O, N, H, CH присутствуют молекулярные соединения солей H₂SO₄, NO₂, которые преобразуются под воздействием УФ-излучения. Также в указанной области содержится значительное количество Na (слой высотой 92 км и толщиной 10 км), K, Fe (высота изменчива, толщиной 2-3 км), попадающих в составе космической и метеорной пыли и составляющих отдельные слои. Существует верхний озоновый слой высотой ~ 90 км и толщиной ~ 22 км, слой возбужденного гидроксила высотой 87 км и толщиной 10 км, возбужденного атомарного кислорода O(1D) высотой 100 км и толщиной 15 км и др. [38]. Частички пыли, гигроскопичных солей, а также соединения металлов являются наиболее вероятными ядрами конденсации, необходимыми для обводнения и последующего образования поля С.О.

Ключевую роль в атмосферных процессах в мезосфере играют колебания уровня солнечной активности, в частности, изменение потока рентгеновского и УФ-излучения в течение 22-летнего цикла. Вследствие активной ионизации молекул и атомов атмосферного состава мезосферы происходят процессы их фотодиссоциации и ассоциации, в результате которых образуется значительное количество водяного пара.

Мезосфера также характеризуется значительным понижением температуры в летнее время, что обусловлено целым комплексом физических

факторов, связанных в единую систему. В первую очередь следует указать малую степень поглощения солнечной энергии на этих высотах. В летнем полушарии преобладают восходящие потоки воздуха – происходит перенос нагретого у поверхности земли воздуха (водяного пара, различных мельчайших частиц и др.) через полярную область в мезосферу, охлаждая ее до экстремально низких температур, что приводит также к сильному понижению давления и плотности. В зимнем полушарии преобладают нисходящие потоки воздуха с высот термосферы, что приводит к повышению температуры зимней мезопаузы [38]. Благодаря подобным процессам в мезосфере появляется физическая возможность для появления на столь больших высотах полей ледяных облаков.

На высотах 60-110 км происходит самое сильное искажение радиосигнала. Из-за внезапности проявления турбулентных процессов в виде мощных усилений ветров, резких и масштабных по амплитуде скачков температуры этот слой атмосферы остается наименее изученным вследствие малодоступности проведения фактических регулярных наблюдений.

Стратопауза – относительно тонкий воздушный слой, который характеризуется постоянством метеорологических параметров, а также наличием постоянной высокой температуры от 0 до 30°C.

Стратосфера – атмосферный слой, по международной классификации относящийся к области нижней атмосферы и расположенный на высотах от 10-18 до 35-45 км. Состав стратосферы преимущественно молекулярен, и также характеризуется высокой изменчивостью агрегатных состояний вещества. Амплитуда изменчивости основных метеорологических полей – температуры, влажности, ветра и давления в стратосфере выше, чем в тропосфере, поэтому именно данный слой характеризуется высокой турбулентностью и наличием мощных ветровых образований, обладающих скоростями от 50 до 300 км/с (в центре), называемых струйными течениями. Эти ветровые образования формируются на нижних, средних и верхних высотах стратосферы, имеют прерывистую изменчивую структуру и своим

движением создают гравитационные волны, которые оказывают влияние на состояние мезосферы и влияют на погоду в тропосфере. Поле струйного течения имеет ширину трубы до 200 км и опоясывает планету в области высоких и умеренных широт обоих полушарий, имеет достаточно высокую амплитуду изгиба, может быть неразрывным или содержать разрывы.

Переходный слой между тропосферой и стратосферой называется тропопауза, которая характеризуется более стабильным состоянием вещества, а также метеорологических полей температуры, давления, влажности и ветра.

Тропосфера – нижний слой атмосферы, располагается на высотах от 0 до 16-18 км в области экватора и от 0 до 8-10 км в полярных областях. Тропосфера вмещает в себя до 80% всего газового состава атмосферы, представленного в молекулярном виде, и содержит большее количество соединений O, H, N, N₂ и др., таких как CH₄, H₂O. Тропосфера характеризуется активным протеканием термодинамических и гидродинамических процессов, нагревом по большей части от земной поверхности, высокой изменчивостью их характеристик в определенном диапазоне, а также агрегатного состояния газов. Однако, относительно слоев верхней атмосферы, тропосфера имеет постоянную, но меньшую амплитуду изменчивости основных метеорологических полей – температуры, влажности, ветра, давления.

На мезосферу оказывает влияние как стратосфера, так и верхний и наиболее обширный атмосферный слой, характеризующийся высокой степенью ионизации атмосферных газов – термосфера. В ИС существуют локальные максимумы вещества, которые приводят к образованию трех основных слоев с различными свойствами – D, E и F (F1 и F2). Каждый слой имеет свою физику процесса – в каждом слое по-разному происходит рекомбинация, диссоциация, ионизация, также немножко отличается химический состав и разные концентрации свободных электронов.

однако касательно проникновения солнечного излучения и ионизированных вторичных и других частиц и фракций в более низкие слои атмосферы сегодня делается поправка. Учитывается, что при масштабной ионизации атомов и молекул термосферы происходит опускание ионизированных частиц в более низкие слои с последующими изменениями физических свойств среды. Таким образом, влияние выше- и нижележащих слоев атмосферы на область мезосферы и мезопаузы при определенных условиях имеет место быть и их следует учитывать при проведении исследований данной атмосферной области. Протекание некоторых из этих процессов будут учтены и описаны в данной работе.

§1.2. Физические параметры СО

Это уникальное явление наблюдается в области приполярных и умеренных широт в предутренних или вечерних сумерках в основном в летнее время. Облака располагаются на высотах от 75 до 95 км, захватывая область верхней мезосферы и мезопаузы, и их видимость зависит от угла склонения солнца за линию горизонта, который должен составлять порядка 6-12° [20].

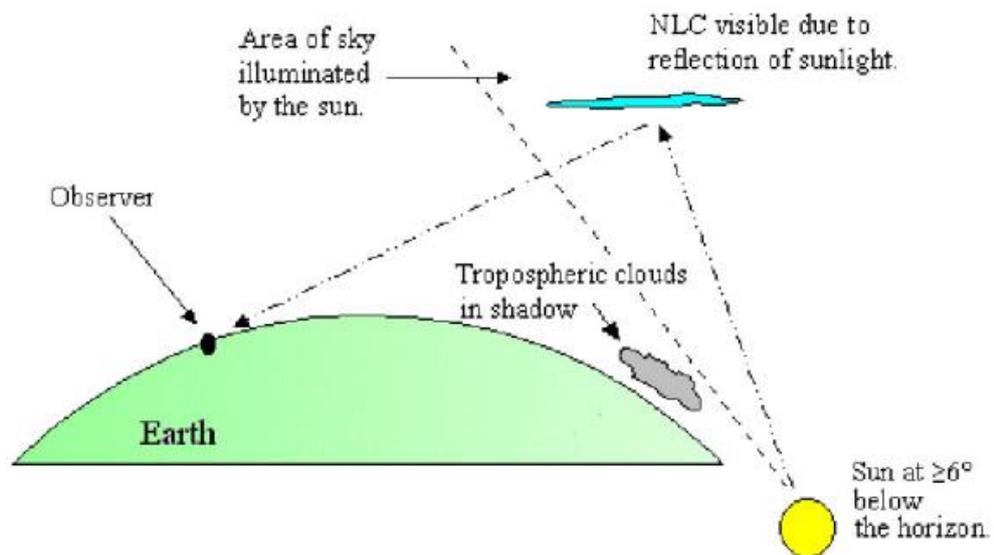


Рис.3. Условия видимости С.О. с поверхности Земли.

Благодаря спутниковым наблюдениям, проводимым аппаратом АИМ, спутниковым спектрометром SCIAMACHY и рядом других экспериментально установили, что серебристые мезосферные облака составляют обширный облачный слой, расположенный вокруг полюса летнего полушария Земли. Согласно одной из главных гипотез происхождения С.О., их слой состоит из мельчайших ледяных частиц, которые образуются в основном на высотах от 80 до 95 км и интенсивность их увеличения повышается ближе к дате наступления периода летнего солнцестояния (19-25 июня). При этом частота их появления нарастает примерно в районе 15-20 дней перед и после наступления летнего солнцестояния (21-22 июня) [22].

Было выявлено, что твердые частицы, способные служить ядрами конденсации для образования мезосферных облаков, в верхней атмосфере присутствуют постоянно, поступая преимущественно из межпланетного пространства в виде космической и метеорной пыли и из нижних слоев атмосферы в виде частичек вулканической пыли, земли, солей и молекул металлов. Также следует учитывать и фотохимические реакции, связанные с увеличением уровня солнечной активности в летний период, что также взято за основу в данной работе.

Однако образование льда при низких показателях давления (примерно $5 \cdot 10^{-6}$ от давления на поверхности Земли) возможно только при экстремально низких температурах, когда парциальное давление выше давления насыщенного водяного пара, что как раз и достигается на высотах 80-85 км.

По данным исследований, в последние десятилетия условия верхней мезосферы отличаются довольно резкими и значительными перепадами температуры, особенно в высоких широтах в летнее время. Именно происходящие летом периоды резкого понижения температуры воздуха в верхней мезосфере и мезопаузе до -120° ... -150° позволяют привести к переохлаждению водяного пара, образующегося путем фотохимических реакций, и образованию пелены полупрозрачных ледяных облаков.

С.О. часто обладают ярко выраженной волнистой структурой. Данная структура предположительно появляется по причине периодического прохождения через мезосферу планетарных и акустико-гравитационных волн, создавая возможность образования С.О. на их гребнях. При этом температура на гребнях волн и в их ложбинах может отличаться на десятки градусов [23]. Протяженность таких волнистых гряд по высоте может составлять 20 км, что может быть обусловлено периодическим появлением большого количества волновых образований, а также более высоких температур в мезосфере ниже 80 км. При этом движение всей массы облаков может происходить как медленно, так и достаточно интенсивно, что говорит о периодическом формировании в верхней мезосфере ветров высоких скоростей.

Попытки определить размеры частиц С.О. на протяжении 120 лет их изучения делались неоднократно. В начале 2000-х годов XXI века, благодаря спутниковым спектрометрам, было выявлено, что размеры частиц С.О. варьируются в диапазоне 0,1-1,5 мкм. Способность самой частицы с размером менее длины волны рассеивать свет зависит от ее радиуса, и поэтому видимой можно считать только самую крупную фракцию частиц до 0,1 мкм. Это же делает измерение размеров частиц важным для понимания процессов, происходящих в верхней мезосфере в летнее время [23].

Исследования, проводимые с помощью спутникового спектрометра SCIAMACHY, оказались весьма информативными и касались в основном определения размеров частиц СО и частоты их появления в различных широтах обоих полушарий. По данным зондирования было выявлено, что частота их появления может достигать максимальных значений в летнее время, различных для широт обоих полушарий (Таблица 1.).

Таблица 1.

Данные Северных широт		Данные Южных широт	
Частота, %	Широта, °С	Частота, %	Широта, °С
90-100%	80 °С с.ш.	80-90%	80 °С ю.ш.
60-70%	70 °С с.ш.	30-50%	70 °С ю.ш.
10-20%	60 °С с.ш.	5-10%	60 °С ю.ш.

Предполагалось также, что частицы С.О. имеют сферическую форму и состоят из водяного льда. В работе использовались данные исследований Баумгартена, Бергера и Ван Занна, что способствовало также необходимости получения и обработки лидарной информации [22].

По данным зондирования, яркость свечения С.О. в северных широтах на 35-40% больше и высота их появления на 1-3 км ниже максимальной, по сравнению с показателями южного полушария.

Говоря о морфологических свойствах частиц С.О. следует отметить, что, как правило, визуальная структура и форма серебристых облаков скорее соответствует структуре и форме перистых облаков. При этом форму обводненных частиц, согласно известным физическим законам, принято считать сферической. Однако, сферическая форма не может обладать такой высокой оптической проводимостью, которая свойственна С.О. Согласно подтвержденным спутниковым данным, форма и размеры частиц С.О. могут существенно варьироваться от начальной стадии образования к финальной [2].

Ракетные исследования и заборы проб воздуха с высот мезосферы и мезопаузы в летний период, осуществленные в разные годы [1], [21], [22], показали, что форма частиц С.О. на стадии обводнения ядер конденсации имеет сферическую форму, тогда как в период дальнейшего роста и образования капель под воздействием низких температур водный слой капли охлаждается, и приобретает уже форму вытянутых цилиндров. Частицы формируются в количестве, достаточном для слипания вследствие

непрерывного процесса испарения и образования водяного пара и образования областей высокой концентрации ледяных частиц С.О. – разорванных ледяных полей С.О.

Предположение, что поле частиц С.О. располагается не сплошным слоем, а скорее фрагментарно, с разницей высот в пределах 75-100 км, что с поверхности земли и из космоса может наблюдаться, как ровная пелена облаков [1], подтверждается данными радиометра MAARSY (Рис. 3).

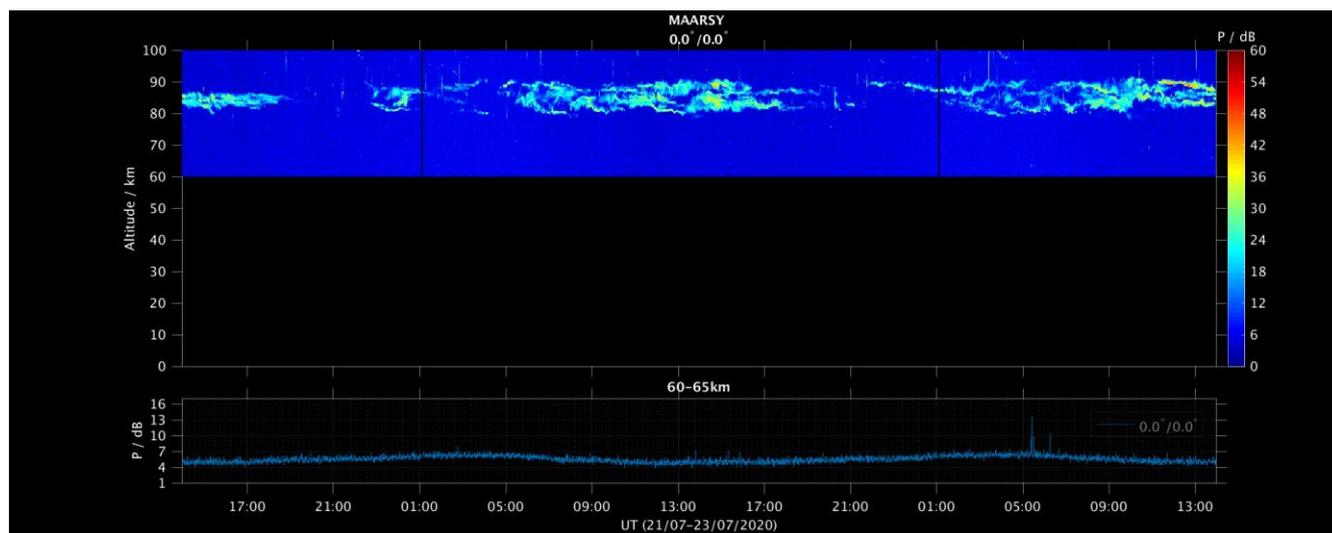


Рис. 4. Визуальная структура поля С.О. по данным радиометра MAARSY за 17-23.07.2021г. [28].

Можно отметить, что разброс высот фрагментов С.О. не всегда может быть значителен при различных условиях образования и появления серебристых облаков. Согласно результатам регулярно проводимых визуальных наблюдений, чаще всего нити серебристых облаков располагаются в определенной гармоничной последовательности, что, видимо, обусловлено различными физическими условиями мезосферы (температурой, степенью влажности, уровнем атмосферного давления, уровнем солнечной активности (интенсивности солнечной радиации), химическим составом, мощностью конвекции и величиной скорости ветра в определенный временной промежуток на данном диапазоне высот.

Бесспорным представляется предположение, что структурные особенности и интенсивность появления С.О. может меняться в зависимости

от времени года, солнечного цикла и текущих условий в мезосфере – появление протонных штормов в верхних слоях атмосферы, запуски космических аппаратов, а также сезонные изменения гравитационных волн, акустических волн, атмосферных планетарных волн, атмосферных приливов и отливов. Также предполагается, что на размер частиц, форму облаков и частоту их появления оказывают влияние особенности лунного цикла – перигей и апогей, вследствие изменения силы притяжения Луны и расстояния между Землей и Луной [38]. Также не до конца изученными остаются условия в верхней мезосфере, способствующие появлению С.О. в широтах ниже 42° с.ш. Все возможные влияющие факторы, земные и космические, необходимо учесть и измерить в ходе проведения дальнейших исследований особенностей С.О. [20].

§1.3. Микроструктура СО

По данным исследований области верхней мезосферы и мезопаузы, в основе образования С.О. лежат химические процессы распада и соединения веществ с участием солнечного излучения и молекул воды. В данной работе мы придерживаемся версии, что под воздействием солнечной радиации происходит диссоциация молекул серной и азотной кислот, метана и воды, и слияние их с атомами кислорода, что приводит к образованию прозрачных ледяных кристаллов [22].

Поскольку на исследуемых высотах 75-110 км выявлено присутствие различных факторов, влияющих на формирование ледяных частиц поля С.О. и ввиду нелинейности атмосферных процессов, для получения более точных данных следует учитывать их все:

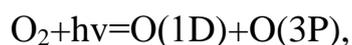
- понижение температуры воздуха в верхней мезосфере и мезопаузе в летнее время до экстремально низких температур (-130° ...-170°);
- воздействие планетарных и гравитационных волн, создаваемых различного рода возмущениями (землетрясениями, циклоническими образованиями в тропосфере и стратосфере), на структуру С.О.;

- воздействие атмосферных и лунных приливов и отливов;
- влиянием процессов фотодиссоциации и ассоциации в результате воздействия УФ-излучения Солнца.

Одним из вероятных источников проникновения водяного пара в верхние слои атмосферы можно считать процесс диффузии влаги из нагретой в летний период континентальной тропосферы. Однако, вследствие турбулентных процессов в тропосфере и стратосфере, а также большой амплитуды изменения градиента температуры с высотой, этот процесс происходит медленно и занимает достаточно длительный период времени.

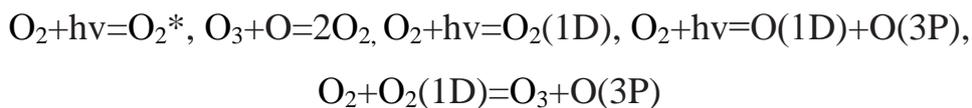
Благодаря проведению многолетних исследований известно, что водяной пар в достаточном для конденсации количестве находится в свободном виде на высотах мезосферы не может. Существует гипотеза, которая представляется нам наиболее вероятной, что он образуется в результате фото-химических реакций, происходящих на высотах верхней мезосферы вследствие воздействия солнечного УФ-излучения и поглощения его молекулами и атомами газов в соответствующих спектрах – происходит диссоциация молекул кислорода в полосах поглощения Шумана-Рунге (176-195 нм), в континууме Шумана-Рунге (122-176 нм), в линии солнечного спектра 122 нм (Лайман- α). Благодаря им же, с огромной долей вероятности, происходит и образование С.О. – из молекул и атомов Н, О, N, S, O₂ под воздействием солнечного света.

Одним из наиболее важных фотохимических процессов в верхних слоях атмосферы является диссоциация молекул кислорода с образованием атомарного кислорода:



где $\lambda < 242$ нм), O(1D) – атом кислорода в возбужденном состоянии (синглетный O); O(3P) – атом кислорода в основном состоянии. Вследствие этой реакции кислород в атмосфере на высотах более 100 км находится как в молекулярном, так и в атомарном состоянии.

Также следует учесть реакции диссоциации:



Ассоциация молекул O:



Ассоциация других компонентов воздуха:



где O(1D) – атом кислорода в возбужденном состоянии, O(3P) – атом кислорода в основном состоянии, O₂* – молекула кислорода в возбужденном состоянии (синглетный O), M – нейтральная молекула в-ва, hν – солнечная постоянная (постоянная Планка).

В ПГИ КНЦ РАН, Апатиты, в 2021 году было проведено исследование процессов возбуждения атомарного O авроральными электронами, реакция переноса энергии этого возбуждения на молекулы O₂, переноса возбуждения с метастабильного молекулярного N₂ и атомарного O(1D) при столкновении с молекулярным O₂ с образованием синглетного кислорода (состояние 1S с последующим переходом в состояние 1D, с излучением линии 557.7 нм и возбуждением O₂(b1Σg+,v'=0,1) при столкновениях с O(1D)), а также процессы свечения атмосферных полос O₂(b1Σg+,v') → O₂(a1Δg,v'') + hν в нижней полярной ионосфере на высотах 80-120 км. Была выявлена зависимость образования синглетного кислорода больше от столкновения O₂(X3Σg-) с возбужденным авроральным электронам атомарным O(1D), чем от столкновения с метастабильным молекулярным N₂ [5]. Это подтверждает наличие физического процесса электронного возбуждения атомов O на высотах верхней мезосферы и мезопаузы, что также способствует зарядению ядер конденсации и образованию большого числа обводненных ледяных частиц С.О.

Одним из химических процессов, способствующих обводнению ядер конденсации и образованию в мезосфере ледяных частиц С.О. можно считать разрушение молекул метана вследствие воздействия УФ-излучения с

образованием свободных молекул Н и С. Однако известно, что молекулы водяного пара распадаются в мезосфере при освещении их солнечным светом, и период их существования составляет примерно 3—10 дней [24]. Для того, чтобы компенсировать интенсивность их распада, необходимо постоянное наличие влаги и других химических элементов и соединений, что может быть объяснено опять-таки фотохимическими реакциями ассоциации и диссоциации молекул и атомов основных веществ, содержащихся в воздухе, а также возбуждением молекул и атомов О до синглетного состояния с ассоциацией О при столкновении с другими компонентами воздуха.

Следует также учесть, что одним из новых и перспективных способов укрупнения частиц в современной химической промышленности является еще изучаемый метод звуковой коагуляции. Метод реализуется посредством воздействия механических колебаний звуковых, ультразвуковых и инфразвуковых волн на мельчайшие частицы метеорной и космической пыли. Колебательное воздействие вызывает интенсивную вибрацию частиц, увеличивая число их столкновений, что способствует их сцеплению друг с другом и укрупнению (агломерации) [25]. Подобный эффект, предположительно, может присутствовать в слое верхней мезосферы и мезопаузы вследствие проникновения в среду данных видов звуковых волн, и его также можно учесть и рассмотреть в качестве одного из возможных факторов, влияющих на укрупнение частиц космической и метеорной пыли, служащих ядрами конденсации, и частиц С.О., находящихся на разных стадиях обводнения.

§1.4. Гипотезы происхождения СО

Началом изучения серебристых облаков принято считать 1885 год, когда явление наблюдалось повсеместно в области умеренных и приполярных широт. Основными исследователями данного явления выступили европейские астрономы Отто Йессе, Томас Уильям Бэкхаус и

Вацлав Ласка. В России наибольший вклад в изучение данного явления внес Витольд Карлович Церасский. В. Церасскому с достаточной точностью удалось визуально установить высоту облаков — около 75 верст, и их малую оптическую плотность. Отто Йессе также проводил подобные измерения, однако, с несколько меньшей точностью.

С начала XIX века учеными разных стран выдвигалось множество гипотез происхождения мезосферных облаков, связанных, как правило, с возможным наличием ядер конденсации на больших высотах. Самое большое внимание было уделено вулканической, метеорной и конденсационной гипотезам.

Вулканическая гипотеза была высказана впервые немецким исследователем В. Кольраушем в 1887г. Она утверждала, что серебристые облака образуются только в периоды вулканической активности в результате попадания в верхние слои земной атмосферы огромных масс вулканической пыли, которая служит ядрами конденсации. Она была основана на факте, имеющим место после извержения вулкана Кракатау 27 августа 1883 году — после него наблюдались яркие С.О., было зафиксировано длительное и яркое свечение ночной атмосферы по территории всего северного полушария. Однако, данные фактических наблюдений гипотезу не подтвердили — С.О. наблюдались и в вулканически спокойные годы.

Метеорная гипотеза, выдвинутая в 1926 году после падения Тунгусского метеорита, пыталась объяснить феномен появления сияющих высотных облаков количеством метеоритной пыли, попавшей в атмосферу, и связывавшая с падением повсеместное свечение атмосферы и появление СО на территории северного полушария, в дальнейшем также не была подтверждена.

Конденсационная (ледяная) гипотеза получила развитие в 1952 году благодаря исследованиям И.А. Хвостикова, считавшего, что С.О., подобно перистым облакам, состоят из кристалликов льда. С помощью ракеты «Сатурн» на высотах 80-85 км были произведены выбросы большого

количества воды, что так же не способствовало появлению исследуемого явления. Тем не менее, с течением времени данная модель была пересмотрена и окончательно подтверждена только на рубеже XX и XXI вв. в исследованиях, проводимых спутником UARS [19].

Можно с уверенностью сказать, что все проводимые эксперименты и выдвигаемые гипотезы были важными шагами к пониманию сути данного явления. Поскольку для появления любого типа облаков в земной атмосфере обязательным условием является наличия ядер конденсации пылевой, солевой или ледяной структуры, и сегодня известно, что в верхней мезосфере выявлено наличие всех описанных выше структур, все три основные гипотезы можно рассматривать, как комплекс вероятных условий для образования и появления С.О. [20]. Главным образом, считаем наиболее вероятной причиной образования поля С.О. ледяную гипотезу И.А. Хвостикова, связанную с процессом образования ледяных облачных частиц под воздействием электризации, их обводнения и замерзания.

Глава 2. Методика изучения С.О.

Изучение мезосферы и С.О. связано с рядом серьезных технических трудностей. Область мезосферы и мезопаузы расположена на больших высотах относительно поверхности Земли, что обуславливает невозможность запуска пилотируемых научно-исследовательских аппаратов, а также фиксации метеорологических параметров изучаемой области наземными средствами (использованием метеорологических локаторов, запуском аэрологических зондов, методами самолетного зондирования и др.).

В то же время, мезосфера расположена достаточно неудачно по отношению к спутниковым научно-исследовательским объектам – на данных высотах с существующей плотностью воздуха и воздействием гравитации их положение придется постоянно корректировать, что подразумевает возмущение исследуемой среды и большие затраты топлива. По этим причинам изучать это явление и саму область мезосферы и мезопаузы приходится преимущественно с космических аппаратов и средствами лидарного и радиозондирования.

В рамках данной работы следует привести описание аппаратов и методов исследования С.О., применяемых в данной работе.

§2.1. Визуальный метод

Визуальные наблюдения С.О. отличаются наличием некоторых сложностей. С.О. не всегда удобно наблюдать с поверхности Земли – следует учесть множество факторов наблюдения, к тому же облака бывают видны не каждую ночь.

Следует учесть особенности рельефа местности – требуется проводить наблюдения на открытой местности, с 22.30 до 05.30 утра. Чтобы заметить тенденцию визуальных изменений поля С.О., следует учесть также особенности фотосъемки С.О. Ее необходимо проводить в покадровом режиме. При этом фиксируются особенности визуально наблюдаемой

области – волновая структура, яркость, характер и интенсивность морфологических изменений, примерная скорость перемещения.

Подробнее этот процесс описан в статье Ромейко В.А. [44] и в отдельном труде [45].

§2.2. Ракетный метод

Наблюдения поля С.О. и состояния мезосферы с начала XX века проводились также методом запуска ракет с забором проб воздуха – этот способ получил название ракетного метода. Его сложность заключается в том, что между забором воздуха из мезосферы и попаданием проб в лабораторию проходит достаточно много времени, в течение которого происходит изменение химического состава мезосферного воздуха. Подробнее он описан в работе В.А. Бронштейна и Гришина [1].

§2.3. Радиозондирование атмосферы и спутниковая съемка

Спутниковое зондирование является сегодня наиболее точным методом измерения микроструктуры частиц С.О. Данные спутника АІМ позволяют распознавать и фиксировать размеры частиц и плотность воздуха, насыщенного водяным паром и льдом. Аппарат NOAA позволяет проводить съемку единого поля С.О. Данные спектрометра MAARSY дают возможность увидеть пространственную структуру поля С.О. (Рис.4).

Исследование атмосферы также ведется с помощью электро-магнитных радаров. Их работа, как и работа спутников, не зависит от человеческого фактора – съемка ведется круглосуточно в автоматическом режиме. Сигнал отправляется со спутника или космического аппарата (шатл), доходит до земли, отражается и двумя сенсорами аппарата считывается отраженный сигнал. Это позволяет обнаружить одну и ту же точку с разных углов и определять ее высоту. Сегодня электро-магнитные радары установлены не только на спутниках – с конца XX столетия существует американский научно-исследовательский шатл.

В геофизике, метеорологии и изучении С.О. используются данные лидаров – аппаратов дистанционного зондирования, измеряющих расстояние до объекта с помощью автоматизированных оптических систем. Лидар фиксирует информацию о степени отражения света от объекта и скорости возврата сигнала, определяет геометрические характеристики объекта и расстояние до него. Лидарное зондирование может проводиться на одной или нескольких частотах одновременно, и позволяет осуществлять непрерывный сбор данных на частотах 266 нм, 355 нм, 532 нм, 1064 нм на высотах 0-100 км. Многочастотное зондирование позволяет собрать более комплексные данные об исследуемых объектах, например, Рэлеевский лидар, осуществляющий измерение профилей температуры и плотности воздуха на высотах 30-70 км.

Лидар, изучающий атмосферу, имеет возможность также анализировать свойства прозрачной среды, рассеивающей свет. Например, для измерений ряда молекул атмосферы, включая H_2O , SO_2 и CO_2 , используется лидар на комбинационном рассеянии (КР). Аппарат требует наличия мощных лазеров, крупных телескопов и обычно осуществляет измерения высоких концентраций молекул. К атмосферным лидарам также относятся доплеровские – определяют направление и скорость перемещения воздушных потоков в различных слоях атмосферы.

Для лидара на резонансных эффектах характерен тщательный подбор длины волны как излучения лазера, так и излучения, регистрируемого приемником, что необходимо для корреляции этих условий с длиной волны линии поглощения исследуемого атмосферного компонента. Этот метод успешно применяется для измерения концентраций атомарного натрия и калия на больших высотах, в том числе, в калиевом и натриевом слоях мезосферы в области образования С.О. (80-105 км).

Современные научные спутниковые аппараты, из-за сложности и дороговизны конструкций, как правило, снабжены одним видом исследовательской аппаратуры. С этим связано большое их огромное

количество на орбите Земли и, в рамках исследовательских программ, необходимость использования группы спутников для измерения различных характеристик исследуемого объекта.

На спутниках бывают установлены оптические сенсорные системы (ОСС). Их можно сравнить с фототехникой высокого разрешения, их изображения используются при формировании электронных карт Google Maps и Яндекс-карты (режим «спутник»). ОСС делает множество снимков одного и того же объекта в разных спектрах видимого и невидимого нам диапазона. При этом ОСС осуществляет съемку видимого диапазона, и для изучения С.О. не подходят.

Поколение спутников LANDSAT существует с 1987 г. и позволяет получать оптические снимки и данные по температуре поверхности. Можно рассчитать карты температур с помощью программ чтения архива и соответствующих формул.

Изучение С.О. во многих научных работах осуществляется с помощью спутникового спектрометра SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorbtion spectroMeter for Atmospheric ChartographY), который позволяет зондировать атмосферу в спектральном диапазоне от 214 до 2386 нм [21].

Большее значение для данной работы имеют снимки американского аппарата AIM (The Aeronomy of Ice in the Mesosphere), позволяющего осуществлять съемку околополярной области с последующим построением карт сплошного поля С.О. и вычислением его альбеда, распознавать градацию размеров облачных ледяных частиц С.О., а также объемы водяного пара и льда на высотах верхней мезосферы.

§2.4. Эмпирические модели атмосферы

Эмпирические модели атмосферы основаны на собранных оперативных данных о различных физико-химических параметрах изучаемых объектов по высоте атмосферы Земли. Они позволяют осуществлять поиск

информации для расчета профилей температуры и плотности воздуха, давления и других метеорологических параметров.

В данной работе использовались данные температуры и плотности воздуха для высот 50-120 км с шагом 5 км, рассчитанные по модели NRLMSISE-00 [26]. Данная эмпирическая глобальная эталонная модель атмосферы Земли моделирует и вычисляет температуру и плотность компонентов атмосферы: параметры нейтральной температуры, температуру в экзосфере, плотности He, O, N₂, O₂, Ar, H, N и общую массовую плотность. Модель создавалась для корректировки орбиты спутника при ее отклонении вследствие влияния атмосферы Земли и основана на данных наземных радаров, спутниковой и ракетной съемки [42]. Модель подразумевает использование данных геомагнитной и солнечной активности, в частности, данные Кр-индекса, Ар-индекса, а также индекса F_{10.7}, которые были использованы в данной работе.

МСВА – нелинейная модель средней и верхней атмосферы, созданная научным коллективом под руководством российского ученого, д.ф.-м.н., профессора РГГМУ, исследователя нелинейных процессов в верхней атмосфере Земли Погорельцева А.И.

Модель AGWWND предназначена «для расчета распространения монохроматических атмосферных гравитационных волн в средней и верхней атмосфере с произвольными профилями температуры и ветра, с учетом молекулярной диссипации. С ее помощью изучено распространение стандартного ансамбля АГВ через среднюю атмосферу относительно различных температурно-ветровых условий, характерных для различных сезонов и различных уровней солнечной активности» [38].

Глава 3. Анализ процессов формирования и разрушения элементов микроструктуры СО. Практическая проверка гипотезы.

§3.1. Процесс ионизации верхней атмосферы

Ионизация – это процесс стихийного переноса электрического заряда от сильно ионизированных частиц солнечной плазмы (солнечного ветра), попадающих в верхнюю земную атмосферу (выше 100 км) через магнитное поле Земли, а также от космического излучения.

Одной из причин ионизации атмосферы можно также считать излучение радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере. Содержание Ra в атмосфере имеется благодаря выходу его эманаций из почвы (процесс эксгаляции) [4] и может быть равен значению 4×10^{-14} Кюри/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Однако данный процесс наблюдается в основном в тропосфере на высотах до 6 км, поэтому в качестве ионизатора области верхней атмосферы он во внимание не принимается.

Солнечная плазма (солнечный ветер) состоит в основном из протонов (90%) и заряженных α -частиц (9%), заряженных и нейтральных ионов газов, таких как H^+ , He^+ , O^+ , N^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ и др. Большая часть частиц сильно ионизированной солнечной плазмы на высотах более 10-15 тыс. км отклоняется силовыми линиями магнитного поля Земли и оказывается в хвосте земной магнитосферы. Фронтальная часть силовых линий магнитного поля Земли (магнитопауза), на которую приходится основной удар ионизированных солнечных частиц, размыкаясь, отклоняет поток солнечной плазмы в хвостовую часть магнитосферы, где затем сбрасывает в космическое пространство накопленный за достаточно короткий промежуток времени (от нескольких часов до нескольких суток – в зависимости от количества поступающего вещества) объем заряженной плазмы вместе с частью силовых линий магнитного поля Земли. Энергетический потенциал солнечных космических лучей составляет до 10^{10} эВ.

Магнитные силовые линии магнитосферы, в основном, остаются замкнутыми, а перпендикулярные к ним линии потока плазмы имеют разрывы. Часть ионизированной плазмы, под воздействием возникающего во фронтальной части магнитосферы в результате обтекания плазмой мощного электрического поля, перемещается по ним обратно в область магнитопаузы, и через магнитные полюса, Северный и Южный, попадает в в.а. Земли. Происходит процесс конвекции плазмы поперек геомагнитного поля Земли [15].

Вторым наиболее вероятным ионизатором, признанным современной наукой, является галактическое космическое излучение. Основным источником данного вида излучения принято считать взрывы сверхновых звезд. Большой энергетический потенциал космических лучей принято объяснять, в основном, ускорением частиц на ударных волнах, образующихся при взрывах сверхновых звезд. В состав данного вида излучения входят также частицы, имеющие нейтральный заряд, такие, как фотоны и нейтрино [4].

Космические лучи принято делить на несколько основных видов:

- метагалактические лучи, приходящие из пространств, лежащих за пределами нашей галактики (внегалактические частицы, до 10^{20} эВ);
- галактические лучи, несущие частицы из различных областей нашей галактики (до 10^{17} эВ);
- космические лучи, генерируемые Солнцем (до 10^{10} эВ).

Космическое излучение обладает довольно широким спектром энергий, однако современными приборами удается измерить только малую его часть. Также на данный момент практически невозможно вычислить, из какой звездной или галактической системы пришло полученное нами космическое излучение.



Рис.5. Схема взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли.

Согласно принятой в современной науке концепции, ионизация происходит в результате взаимодействия ионов и протонов солнечного ветра и космического излучения с ядрами атомов воздуха верхней атмосферы Земли. Создается большое количество вторичных частиц – пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов. Вторичные частицы взаимодействуют как между собой, так и с газами атмосферы, и также распадаются, образуя целые каскады вторичных соединений. Этот процесс был впервые описан в 1938 г. французским физиком Пьером Оже и назван широким атмосферным ливнем – ШАЛ (Рис.3).

ШАЛ, спускаясь в нижние слои атмосферы, оказывает влияние на электро-химические процессы, происходящие в них, что выражается в процессе высокой электризации газов и частиц, в том числе, периодическим появлением на высотах до 200 км крупных электрических всполохов – спрайтов, эльфов, джеттов и др.

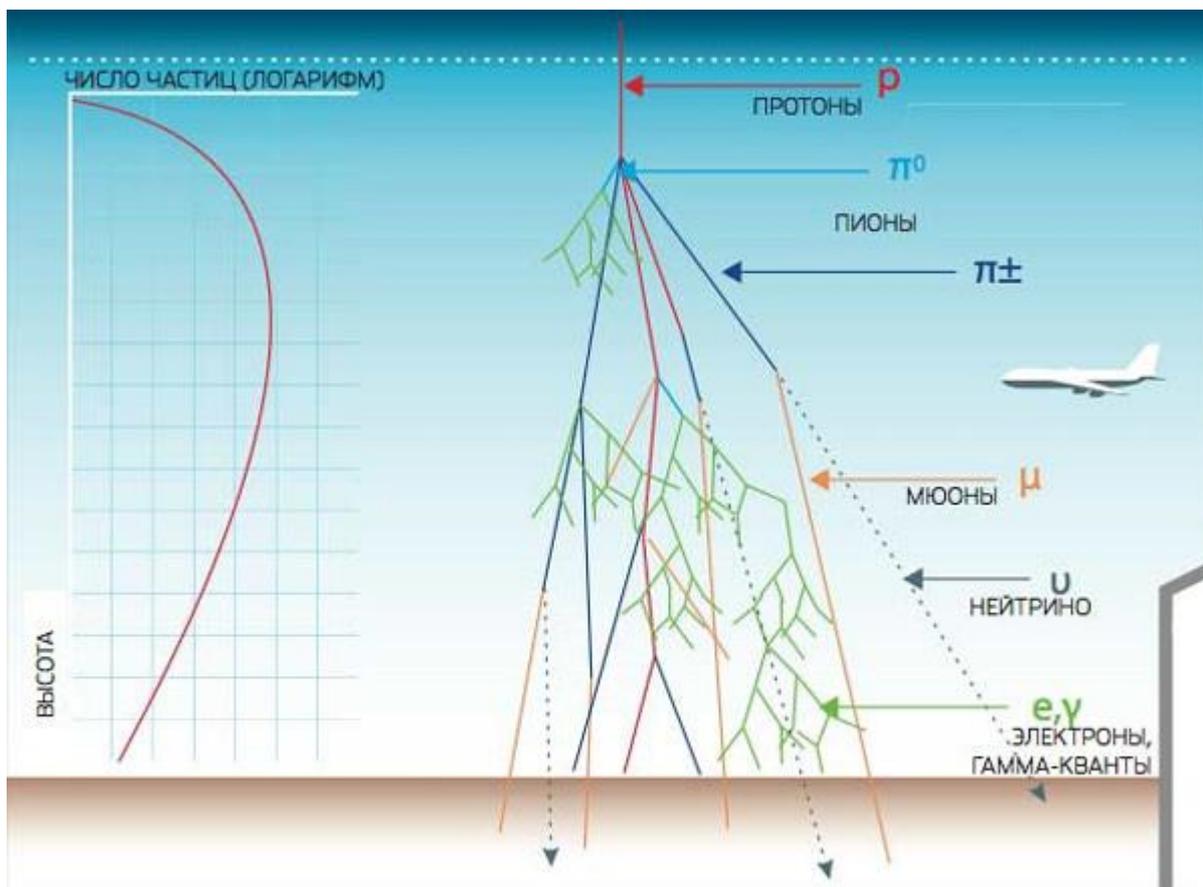


Рис. 6. Схема образования широкого атмосферного ливня

На высотах около 100-200 км некоторые фотохимические процессы, происходящие под воздействием заряженных ионов, приводят к свечению атмосферы, наблюдаемому как собственное свечение ночного неба. Это также связано с нагревом атмосферы и выделением тепла вследствие протекания химических реакций, связанных с возбуждением и электризацией.

Ионы в атмосфере характеризуются двумя основными параметрами – наличием электрического заряда и подвижностью. Под воздействием электрических сил ионы, находясь во внешнем электрическом поле, перемещаются вдоль его силовых линий со скоростью u , пропорциональной напряженности поля E . Скорость этого дрейфа с $E=1$, принято называть подвижностью ионов $k=u/E$, где k – подвижность иона, которая выражается в $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ или в $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [4].

В современной науке считается, что максимум ионообразования под воздействием солнечного коротковолнового излучения происходит на

высотах 150-200 км. При этом ионы на больших высотах живут достаточно долго, не подвергаясь рекомбинации. Процессы диффузии приводят к распространению электронов и ионов в верхнем и нижнем направлении от области максимума ионообразования, что способствует их опусканию в область верхней мезосферы и мезопаузы.

Ионизация – фото-электро-химический процесс, включающий передачу заряда атомам газов верхней атмосферы и последующее их преобразование. Процесс ионизации подразумевает сообщение молекуле или атому газа энергии, достаточной для «выбивания» одного из наружных валентных электронов атома газа из сферы действия ядра. В результате изначально электрически нейтральный атом (положительный заряд ядер равен общему заряду валентных (наружных) электронов), лишившись одного из наружных электронов, становится положительно заряженным. Свободный электрон в условиях нормального тропосферного давления, присоединяется к одному из нейтральных атомов окружающей среды почти мгновенно (за время, меньшее 10^{-6} с), в результате чего образуется отрицательный ион. Таким образом, попарно образуются имеющие молекулярные размеры положительный и отрицательный ионы, несущие в себе по одному элементарному заряду $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ К [4].

Для процесса ионизации характерно положение, что первичные ионы не могут существовать достаточно долго – они должны постоянно преобразовываться, передавая свой заряд окружающим частицам и атомам газов. Под воздействием поляризации к ним присоединяются атомы из окружающей атмосферы, сохраняя разный уровень заряда и образуя легкие, средние и тяжелые ионы.

Принято считать, что для положительных ионов количество поляризуемых ими молекул или атомов составляет до 13, для отрицательных около 7 [4]. Отрицательные ионы располагаются преимущественно в нижних слоях ионосферы, в частности в верхней мезосфере, поскольку плотность

нейтральных частиц там выше. Они образуются в результате присоединения свободного электрона к нейтральной частице [15].

Вполне возможно, что ионизация является причиной возникновения в атмосфере не только разнообразных химических реакций, протекающих достаточно стремительно на разных высотах верхней атмосферы Земли. Можно предположить, что ионизация верхней атмосферы служит также одной из причин появления атмосферных волн, создавая возмущения электро-магнитного поля Земли и передавая мощный электрический заряд его силовым линиям.

Несомненно, процессы, происходящие в атмосфере, оказывают взаимное влияние и являются причиной появления различного рода атмосферных волновых возмущений, в том числе полярных сияний. Академик Чижевский предполагал, что взаимосвязь атмосферных процессов гораздо более тесная: «магнитные бури сопровождаются интенсивными полярными сияниями, кривая частоты которых в точности повторяет кривую магнитной деятельности Земли, а, следовательно, и кривую солнечных пятен» [16].

Говоря о процессе ионизации, следует рассмотреть также вопрос воздействия УФ-излучения на верхнюю мезосферу и область образования С.О. К ультрафиолетовому излучению относят часть коротковолнового излучения в интервале 10,0-360 нм. Атом водорода имеет 8 квантованных энергетических уровней и так называемый континуум [30].

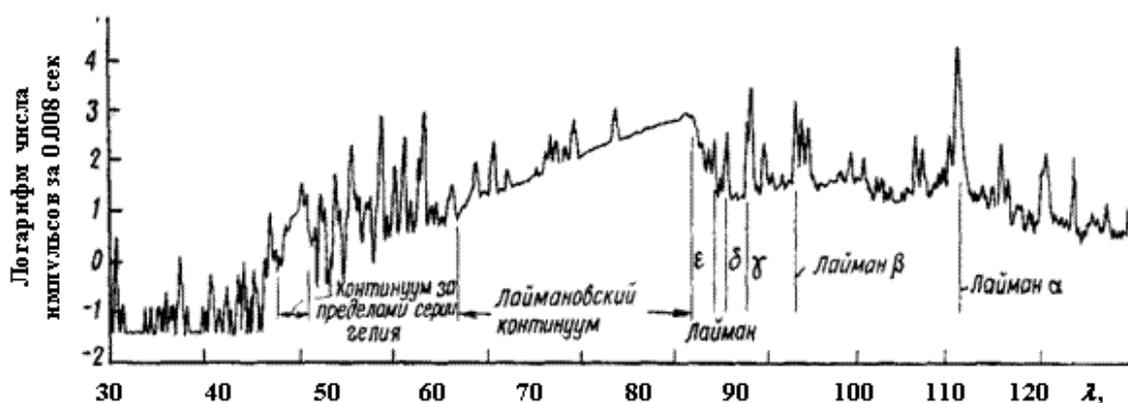


Рисунок 7. - Спектр УФ излучения Солнца [33]

При взаимодействиях внешнего излучения и нейтрального атома, электрон последнего переходит на одну из более низких орбит. При возвращении на исходную орбиту излучается фотон строго определённой энергии.

Поэтому, на фоне непрерывного спектра излучения, присутствуют отдельные линии. Длина волны излучения атома при переходе электрона с одного уровня на другой определяется выражением: $\lambda = \frac{E_{i+1} - E_i}{2\hbar}$

энергия кванта: $E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}$

Радиусы орбит описываются формулой: $R_n = \frac{\hbar^2 \cdot n^2}{m \cdot e^2}$,

где $\hbar \cong 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка, $m = 9 \cdot 10^{-31}$ кг - масса электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона, $n = 1, 2, 3 \dots$ - порядковый номер орбиты электрона. Для невозбуждённого атома радиус орбиты составляет $0,5 \cdot 10^{-10}$ м [30].

На высотах верхней мезосферы и мезопаузы наиболее интенсивными полосами поглощения УФ являются линии эмиссионного водорода $L\alpha$ с $\lambda=121.6$ нм, называемая линией Лаймана- α , а также линии поглощения O_2 , называемые континуумом Шумана-Рунге, располагающиеся в области длин волн 135-175 нм с максимумом вблизи длины волны $\lambda=145$ нм и на высотах проникновения 90-110 км [9]. Поглощение энергии солнечного потока в этой области приводит преимущественно к диссоциации O_2 , CO_2 , паров H_2O , и других нейтральных компонент воздуха.

Линия Лаймана- α в области $\lambda > 100$ нм поглощает больше солнечного излучения, чем весь спектр в интервале коротких волн, и является важным источником ионизации на высотах верхней атмосферы.

В диапазоне длин волн 175-200 нм происходит поглощение O_2 , что составляет систему полос Шумана-Рунге. Данные полосы, в результате поглощения солнечного УФ-излучения, способствуют диссоциации молекул O_2 и образованию атомарного кислорода. Их влияние на процесс диссоциации молекулярного кислорода следует учитывать при проведении

дальнейших исследований интенсивности образования ледяных кристаллов С.О.

Ряд солнечных вспышек переносят большое количество α -частиц и более тяжелых ядер, которые являются источниками интенсивных космических лучей с энергиями 10^7 - 10^9 эВ. В науке эти вспышки называются протонными и фиксируются ИСЗ GOES, NOAA и Мировым центром данных по Солнечно-Земной физике. Их влияние также может быть значимым для процесса роста количества водяного пара и увеличения поля С.О. в летней мезосфере Северного полушария.

§3.2. Конденсация водяного пара в мезосфере

При уровне плотности воздуха и низких показателях давления (примерно $5 \cdot 10^{-6}$ от давления на поверхности Земли), существующем на данных высотах, образование водяных капель может происходить только при условии сильного охлаждения воздуха, когда парциальное давление выше давления насыщенного водяного пара, возможного только в летнее время. Чтобы проверить это утверждение, нам необходимо посчитать показатели парциального давления водяного пара, а также зависимость упругости насыщения от кривизны и электрических зарядов капель с помощью формулы Томсона [50]:

$$E_{r,q} = E \left[1 + \frac{c_r}{r} - \frac{c_q v^2}{r^4} + \dots \right]$$

Здесь c_q для единичного элементарного заряда и температуры 0°C равно $7,5 \cdot 10^{-30} \text{ см}^4$, v – число единичных зарядов на поверхности капли.

Соответственно, для вычисления размеров ядер конденсации получаем следующий расчет:

$$E = 1 + (1,2 \cdot 10^{-7}/r - 7,5 \cdot 10^{-30}/r^4) < 1$$

$$1,2 \cdot 10^{-7}/r < 7,5 \cdot 10^{-30}/r^4$$

$$r^3 < 7,5 \cdot 10^{-30}/1,2 \cdot 10^{-7}$$

$r < \sqrt[3]{7,5 \cdot 10^{-30} / 1,2 \cdot 10^{-7}} = r < \sqrt[3]{60 \cdot 10^{-24}} = \sqrt[3]{60 \cdot 10^{-8}} \text{ см (без корня)} = 4 \cdot 10^{-8} = 0,4 \cdot 10^{-7} \text{ нм.}$

При размере ядер конденсации $0,4 \cdot 10^{-7} \text{ нм}$ размер частиц С.О. вполне может составлять от 0,1 до 1,5 мкм, что соответствует данным исследований [22].

Полученные данные позволяют предполагать следующее. Если в тропосфере конденсация происходит на растворимых ядрах гигроскопичных соединений, на высотах мезосферы и мезопаузы, при практически в 10 раз более низком давлении, обводнение может происходить иначе – частицы ядер конденсации или тяжелые ионы (тяжелее молекулы) должны быть заряженными, и поэтому к ним присоединяется водяной пар. Солнечная вспышка способствует стремительному росту числа заряженных ядер конденсации, что приводит к скачкообразному увеличению поля С.О.

§3.3. Расчеты высотных профилей температуры

Для лучшего понимания процессов образования С.О., рассмотрим результаты расчета высотных профилей температуры и выявления их зависимости от значений индекса солнечной активности $F_{10.7}$. Это позволит нам выявить тенденцию и локализовать высоту появления С.О. в выбранные даты.

Индекс $F_{10.7}$ регистрируется на длине волны 10.7 см (частота 2800 МГц) с 1963 г. и измеряется в солнечных единицах потока (с.е.п.), где $1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$. Индекс $F_{10.7}$ коррелирует с потоком солнечного УФ-излучения и хорошо согласуется с числами Вольфа (R_w), вплоть до их малых значений [31]:

$$F_{10.7} = 67 + 0,97 R_w + 17,6 (e^{-0,035R_w} - 1).$$

Рассмотрим график уровня солнечного излучения на длине волны 10.7 см в течение текущего солнечного цикла по данным сайта космической погоды [28] (Рис.6).

График уровня излучения $\lambda = 10.7\text{см}$ (SFU) в течении солнечного цикла



SpaceWeatherLive.com

Рис.8. Солнечный цикл в графическом виде [28].

На Рис.6 видна динамика уровня излучение при $F_{10.7}$, при которой самый высокий уровень приходится на 2002-2003 гг. При этом на данном графике указывается уровень $F_{10.7}$, соответствующий каждому месяцу каждого указанного года.

Согласно данному графику и данным сайта космической погоды [28], за период мая и трех летних месяцев 2021 года средний наблюдаемый уровень $F_{10.7}$ составил следующие значения (Таблица 3 [43]):

Таблица 3.

Месяц	Уровень $F_{10.7}$	Даты солнечных вспышек	Даты скачкообразного увеличения поля С.О.	Даты равномерного увеличения поля С.О.
Май 2021	75,64	22.05, 26.05, 29.05, 30.05	23.05, 25.05, 28.05, 30.05	20.05, 21.05, 24.05, 26.05, 27.05
Июнь 2021	79,8	01.06, 08.06, 09.06, 10.06, 23.06, 25.06,	02.06, 09.06, 11.06, 24.06, 26.06, 29.06	14.06, 15.06, 20.06, 21-23.06, 25.06, 27-28.06

		28.06, 30.06		
Июль 2021	80,97	03.07, 04.07, 09.07, 16.07, 19.07, 21.07, 23.07, 24.07	04.07, 05.07, 09.07, 10.07, 17.07, 20.07, 22.07, 24.07, 25.07	06-08.07, 11-16.07, 18- 19.07, 21.07,
Август 2021	87,4	08.08	02-03.08	05-18.08

Данные, представленные в Таблице 3, отражают результаты зрительного сравнения увеличения поля С.О. и его плотности, что влечет за собой видимое увеличение альbedo поля. Как правило, даты увеличения поля С.О. полностью совпадают с датами появления солнечной вспышки, только с разницей примерно в сутки. При этом следует отметить, что больший объем роста поля С.О. происходит через сутки после сильнейших вспышек, имеющих два или все 3 спектральных класса (С, М, Х) – 22.05 (С=10, М=2), 23.05 (С=4, М=1), 26.05 (С=7), 08.06 (С=3), 28.06 (С=2), 03.07 (С=3, М=2, Х=1), 04.07 (С=4, М=1), 08.08 (С=1) [28].

Возможно предположить, что в эти даты в атмосферу Земли попадало наибольшее количество солнечного УФ-излучения и других видов излучения, запускающих активные процессы диссоциации и ассоциации с последующим активным образованием ледяных кристаллов С.О. Потенциал солнечной энергии, принесенный с солнечным ветром активными и менее активными вспышками, а также энергии солнечных УФ-лучей накапливался в атмосфере и оказывал многоуровневое влияние на физико-химические процессы в мезосфере (в том числе волновые), что через сутки приводило к более равномерному росту поля С.О. и увеличению его альbedo.

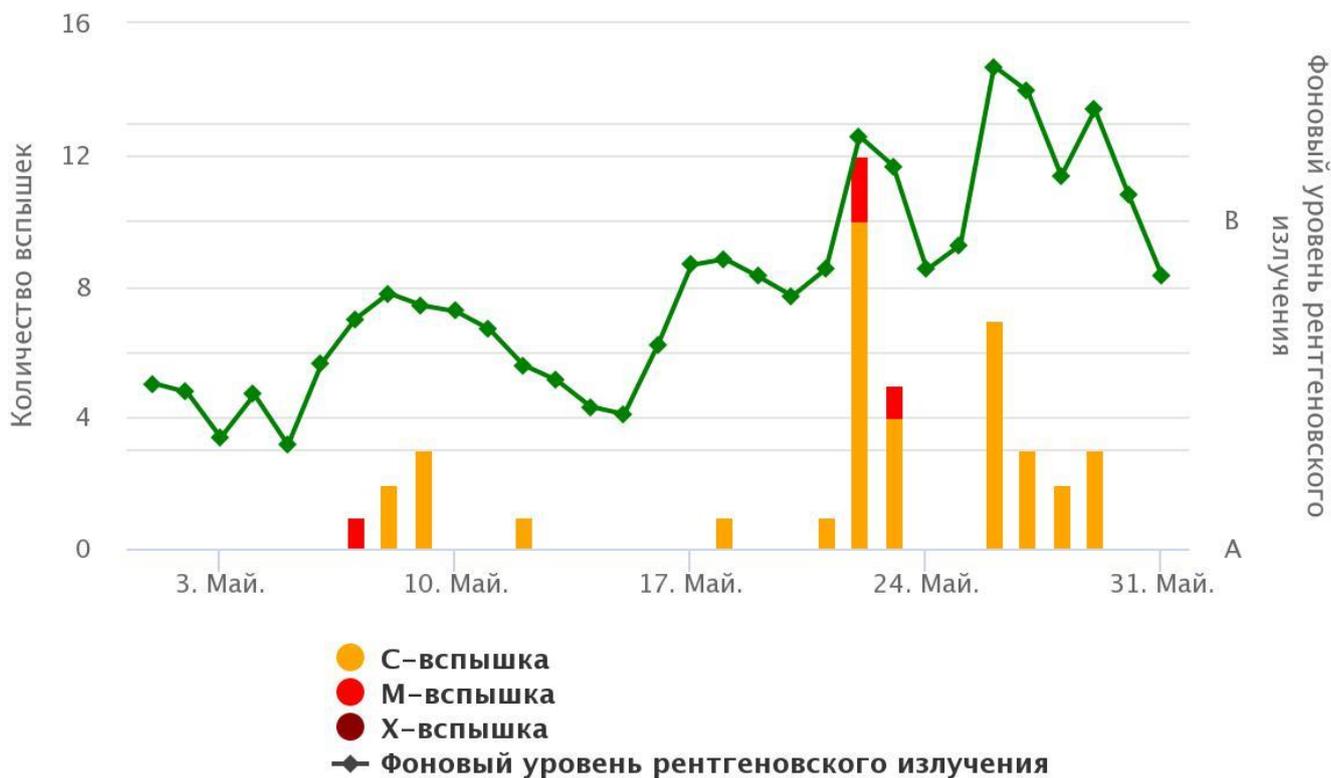
Используя полученные данные по наблюдаемому уровню $F_{10.7}$ для каждого месяца наблюдения поля С.О., а также Ар-индекса для каждого выбранного дня [28], можно получить расчет температурных параметров на высотах верхней мезосферы и мезопаузы через эмпирическую модель атмосферы NRLMSISE-00 на широте г. Апатиты Мурманской области, как

достаточно близкой к краю поля С.О. северной станции, с координатами 67° с.ш., 33° в.д., за 12 UT. Можно рассчитать температуру, а также проследить тенденцию ее изменения через сутки после солнечных вспышек, сравнив тенденцию с данными визуального увеличения полей С.О.

Чтобы понять и проследить тенденцию изменения полей С.О. в зависимости от наличия солнечных вспышек, следует провести сравнение спутниковых снимков полей С.О. в выбранные даты. Для исследования нами были выбраны даты летних дней 2021 года, когда происходили солнечные вспышки, и через сутки происходило резкое увеличение поля С.О.

Согласно данным сайта космической погоды [28], для мая 2021 г. это будут 20.05 и 23.05.

Количество вспышек С-, М- и Х-класса



SpaceWeatherLive.com

Рис.9. Количество вспышек С-, М- и Х-класса за май 2021г. по данным сайта космической погоды [28].

По данным сайта космической погоды, мощная вспышка С-класса (10) произошла 22.05.2021г. (Рис.7). Максимум вспышки пришелся на 17.10 (17.03-17.16) и 21.36 (21.30-21.43) UTC (Рис.7).

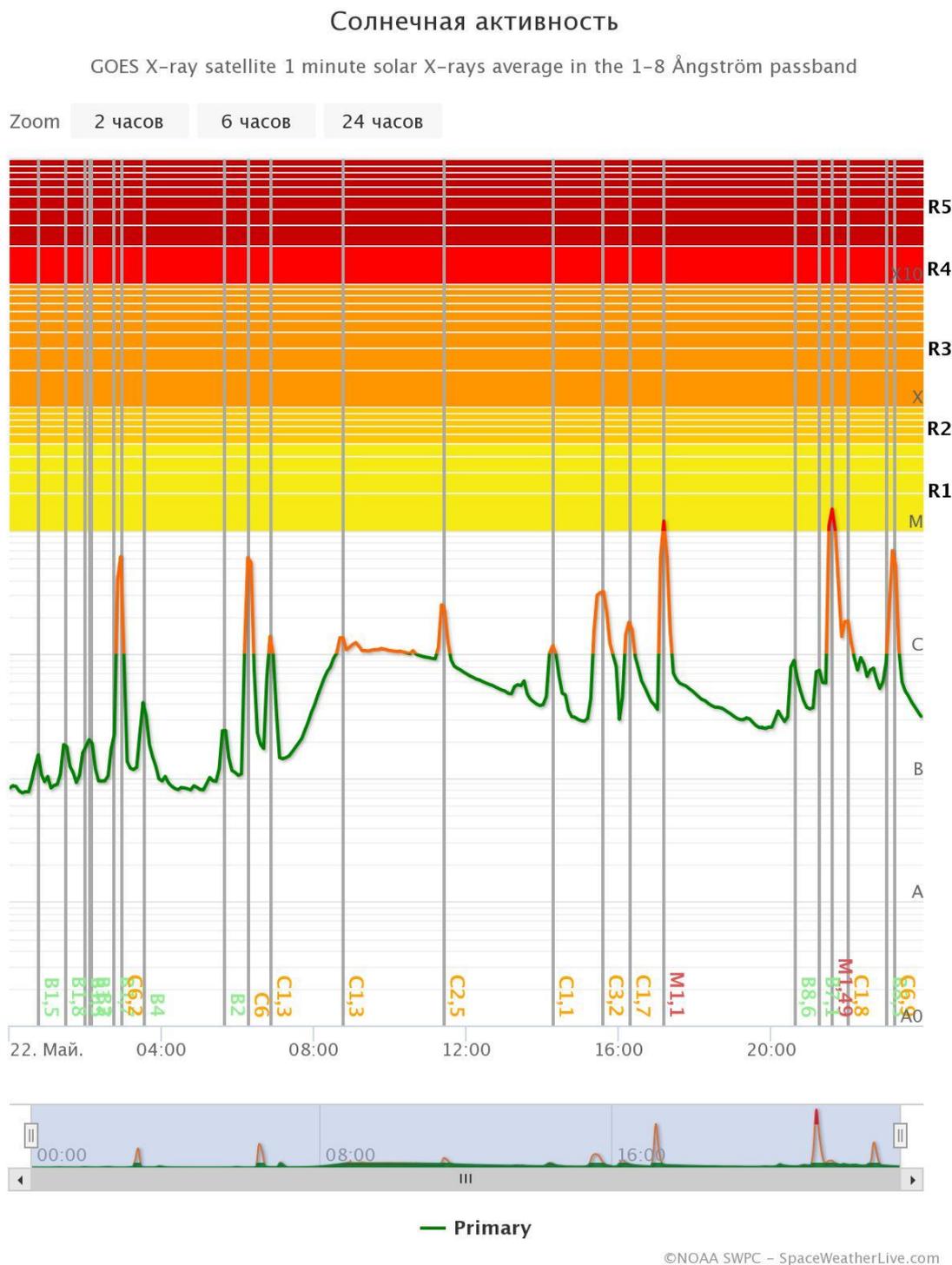
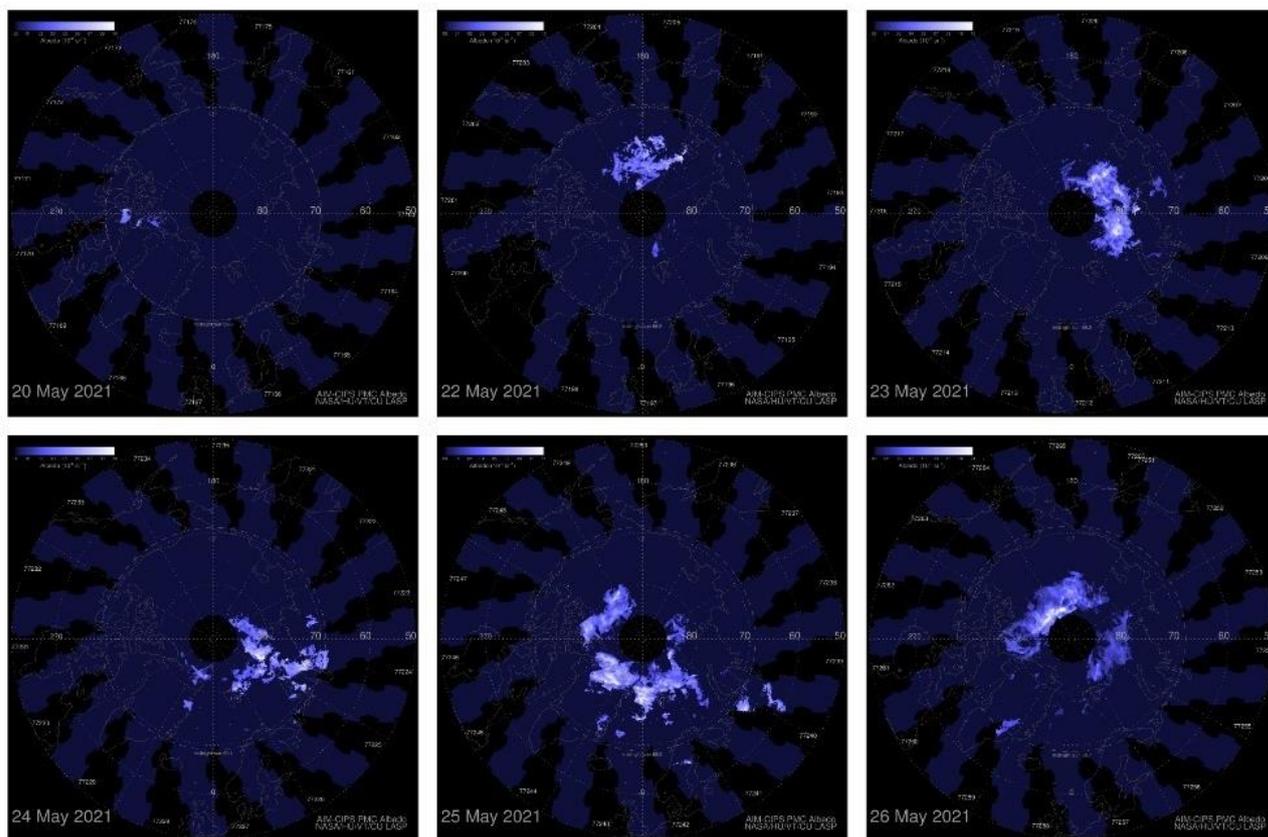


Рис.10. Уровень солнечной активности для 22 мая 2021 г. по данным спутника GOES NOAA [28].

Согласно спутниковым снимкам NASA, скачкообразное увеличение размеров поля С.О. с увеличением его плотности и альbedo происходит через сутки после вспышки (Рис.11).



Тенденция изменения поля С.О. по данным аппарата AIM за май 2021г.

Рис.11. Спутниковые снимки поля С.О. 22 и 23 мая 2021 г. по данным NASA.

Чтобы увидеть взаимосвязь этих процессов и проверить основную гипотезу, необходимо провести поиск и сравнение тенденции изменения параметров поля температуры и массовой плотности воздуха с помощью эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00 за двое суток до вспышки, 20.05.2021 г., когда на картах поле С.О. только появилось, и через сутки после нее. Расчет был сделан для города Апатиты Мурманской области, с координатами 67° с.ш., 33° в.д. для 12.00 UTC. При этом необходимо учитывать уровни Ap-индексов, соответствующие выбранным датам, по

данным сайта космической погоды [28], а также среднее значение $F_{10.7}$ за май 2021г., равное 76 (Таблица 4).

Сравнение данных температуры и плотности вещества на высотах 50-120 км 20.05.2021 г. при $A_p=24$ и 23.05.2021 г. при $A_p=3$ для 12.00 UTC и средних значениях $F_{10.7}=76$ (75,64) с помощью эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00.

Таблица 4.

Высота, км	Темп. Мезосферы, К/20.05	Массовая плотность возд. г/см ⁻³ / 20.05	Темп. Мезосферы, К/23.05	Массовая плотность возд. г/см ⁻³ / 23.05	Разница т	Разница р
50	278,5	1.185E-06	279.2	1.191E-06	0,7	0,006
55	268,0	6.659E-07	268.8	6.703E-07	0,8	0,044
60	254,2	3.690E-07	254.6	3.725E-07	0,4	0,035
65	238,6	1.990E-07	238.5	2.014E-0	-0,1	0,024
70	221,5	1.034E-07	221.0	1.047E-07	-0,5	0,013
75	201,6	5.176E-08	200.8	5.239E-08	0,8	0,063
80	176,1	2.444E-08	174.8	2.467E-08	1,9	0,023
85	157,6	1.001E-08	157.2	9.992E-09	0,4	8.991
90	152,4	3.525E-09	154.9	3.472E-09	2,5	-0,053
95	164,7	1.146E-09	173.6	1.125E-09	8,9	-0,021
100	194,5	3.877E-10	207.0	3.980E-10	5,5	0,103
105	241,8	1.468E-10	236.1	1.674E-10	-5,7	0,206
110	302,8	6.425E-11	262.7	7.820E-11	-40,1	1,395
115	358,6	3.320E-11	304.8	3.785E-11	-53,8	0,465
120	405,0	1.922E-11	366.0	1.941E-11	-39	0,019

По результатам обработки температурных данных и данных массовой плотности воздуха на высотах от 50 до 120 км 20.05.2021 г., в период, предшествующий солнечной вспышке 22.05.2021 г., и в период, последующий за вспышкой – 23.05.2021 г., когда произошло визуальное увеличение поля С.О. и его альbedo, можно сделать вывод: температура и плотность вещества при соблюдении указанных условий меняются в достаточно широких пределах. Изменения температуры на высотах выше 100

км являются индикатором изменений в мезосфере и мезопаузе вследствие воздействия солнечной вспышки. При этом мы видим, что температура в расположенном ниже слое от 85 до 95 км 20.05.2021 достигает более низких значений, чем через сутки после вспышки 23.05.2021. Плотность вещества при этом резко увеличивается на высотах от 80 до 85 км (со значений $1.001E-08$ до $9.992E-09$), что позволяет сделать общий вывод о скачкообразном влиянии солнечной вспышки на область верхней атмосферы и верхней мезосферы.

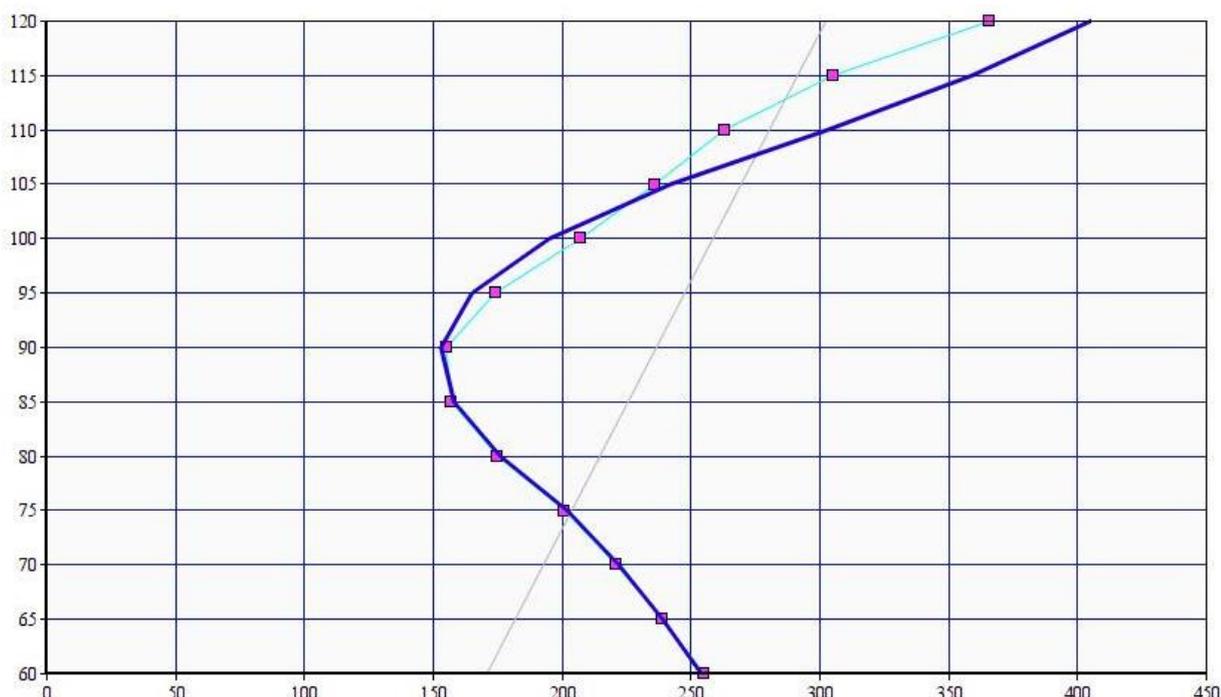


Рис.12. Средняя температура воздуха за 20.05 составила 241,06, за 23.05 – 233,33.

Из таблицы и графика видно, что после вспышки класса $S=10$ с переходом в мезопаузу температура воздуха существенно понижается с высотой – от уровня 105 до 115 км на $48,1^{\circ}K$. При этом видно, что температурные показатели, удовлетворяющие условиям образования С.О. при низких температурах, преимущественно расположены на высотах от 85, 90 км – выше температура уже существенно возрастает. Таким образом, данные эмпирической модели и график по температурным показателям и по объему массовой плотности вещества позволяют локализовать область образования С.О.

Значения массовой плотности вещества понижаются ближе к отметке высоты 90 км, и к уровню 110 км существенно возрастают с разницей показателей в 1.342Е. Это позволяет заключить, что на высотах верхней мезосферы ближе к мезопаузе и термосфере в период начала воздействия вспышки температурные изменения происходят более интенсивно.

Анализ этих данных позволяет предположить, что через сутки после солнечной вспышки температурные показатели мезосферы и мезопаузы несколько повышаются приближаются, что позволяет выделиться большему объему водяного пара, способствует более интенсивному обводнению ядер конденсации и нарастанию поля ледяных кристаллов С.О. на уровне высот от 80 до 90.

Для установления видимой тенденции описанного выше процесса, необходимо провести исследования температурных данных каждой даты, соответствующей периоду до и после солнечной вспышки, после которой визуально наблюдалось скачкообразное разрастание поля С.О. в течение летних месяцев 2021 года.

Для изучения изменений в поле С.О. следует проследить увеличение количества водяного пара и льда, а также размеров частиц С.О. на высотах верхней мезосферы по данным AIM GOES [43].

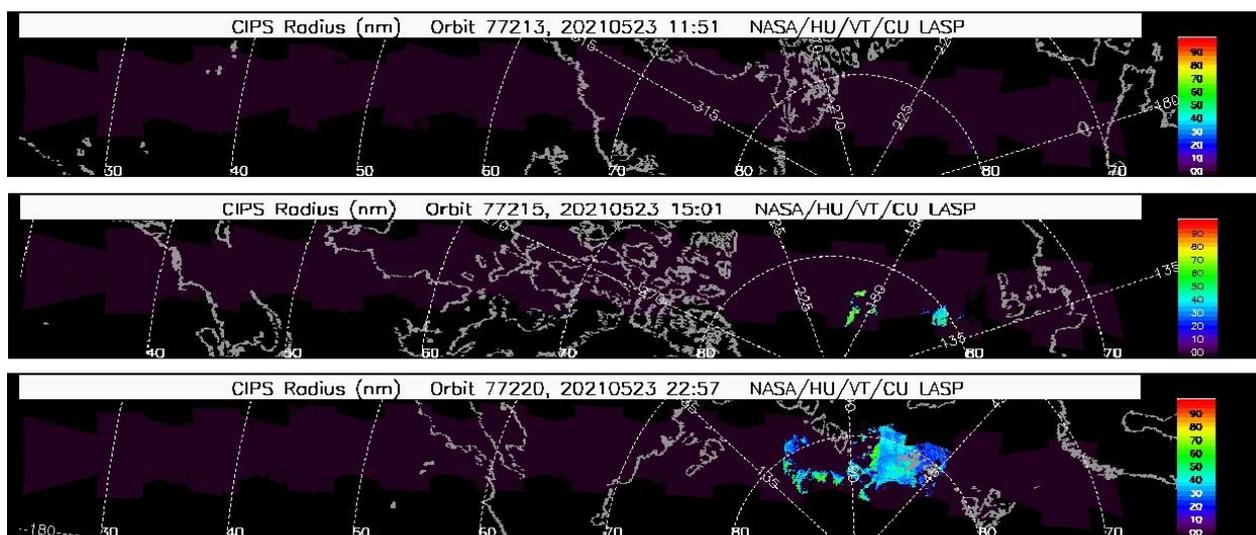


Рис.13. Тенденция изменения радиуса частиц С.О. за 12UTC, 15UTC, 22.57UTC по данным LASP [43].

По снимкам мы видим, что изменения размеров частиц, а также количества водяного пара и льда 23.05.2021 начинают увеличиваться с 15.00 UTC, имеют максимум в 22.57 UTC и идут на спад после 00.37 UTC.

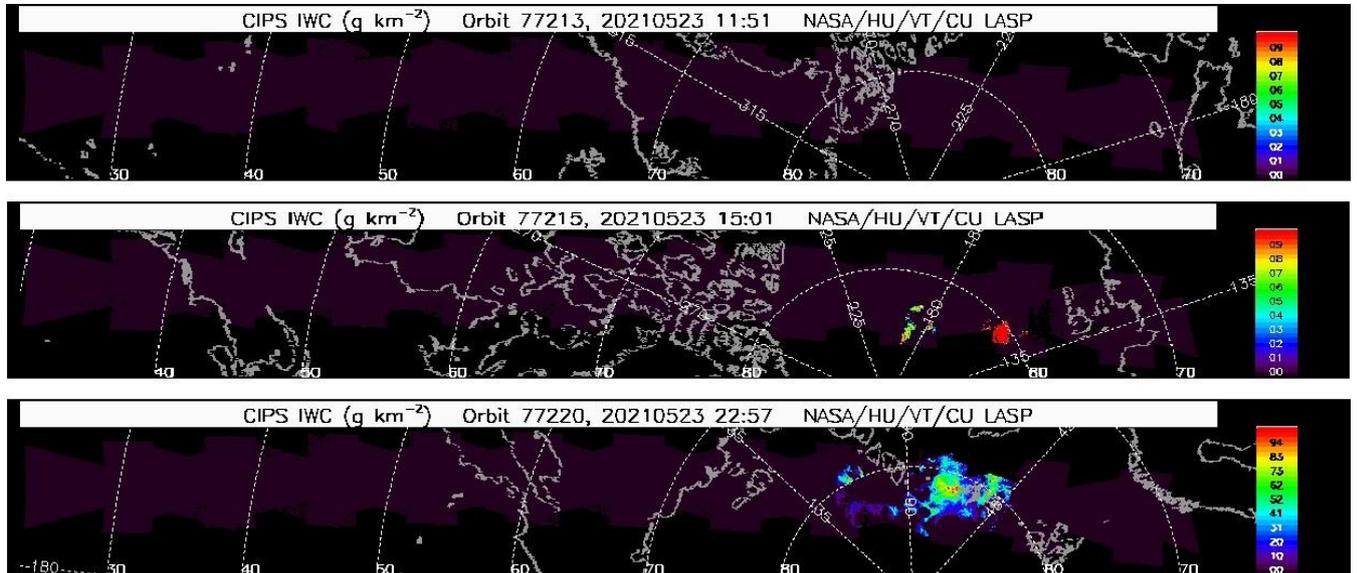


Рис.14. Тенденция изменения количества водяного пара и льда за 12 UTC, 15 UTC, 22.57 UTC по данным LASP [43].

Тенденция понижения уровня водяного пара и льда хорошо прослеживается на рис.15:

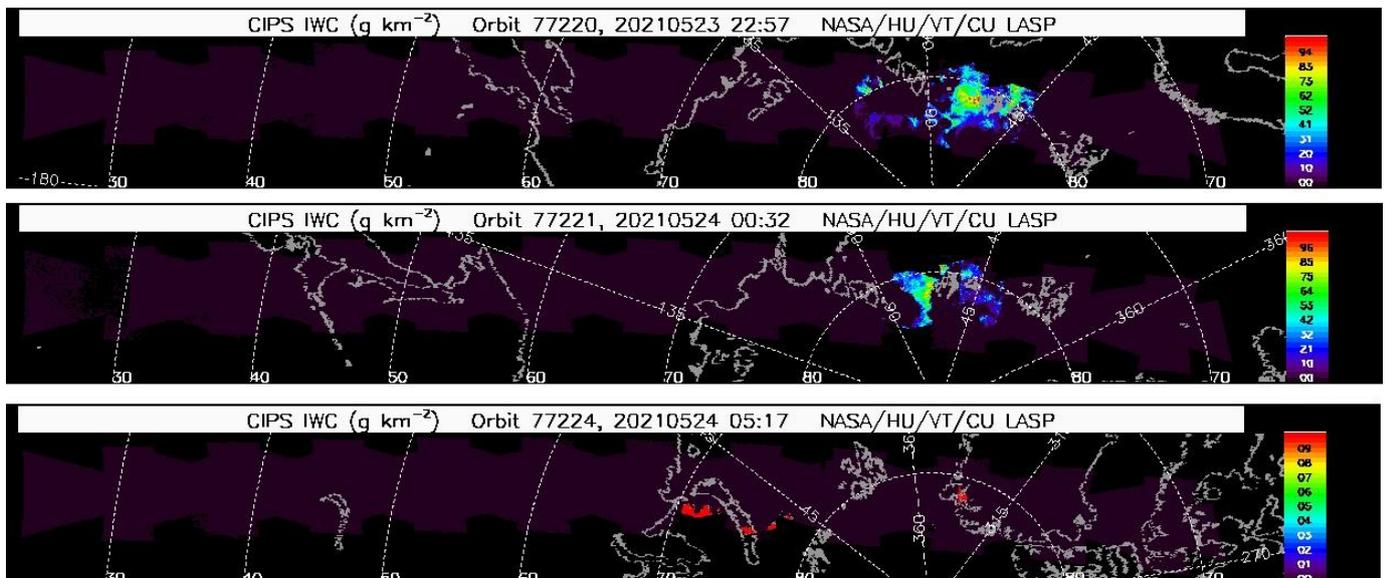


Рис.15. Тенденция понижения количества водяного пара и льда за 22.57 UTC 23.05.2021, 00.32 UTC, 05.17 UTC 24.05.2021 по данным LASP [43].

Тенденция изменения радиуса и количества частиц С.О. хорошо видно на рис.16:

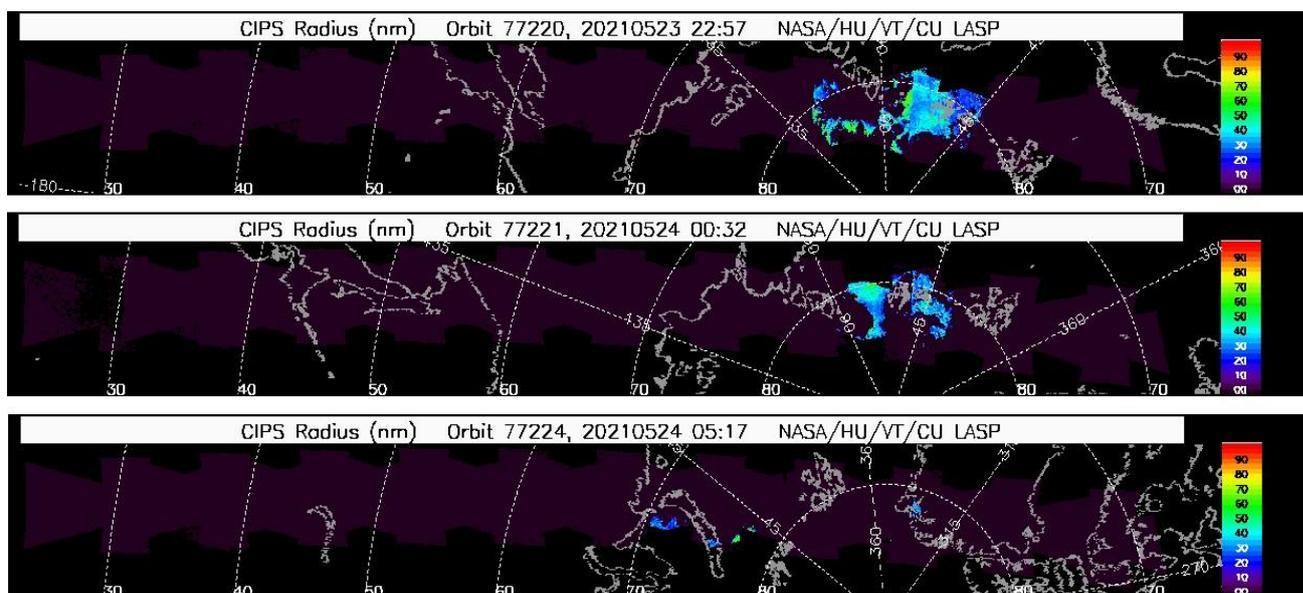


Рис.16. Тенденция изменения радиуса частиц С.О. за 22.57 UTC 23.05.2021, 00.32 UTC, 05.17 UTC 24.05.2021 по данным LASP [43].

Из этого можно сделать вывод, что активные процессы ионизации и диссоциации в верхней мезосфере с увеличением количества водяного пара и льда и образованием ледяных кристаллов С.О. начинают происходить менее чем через сутки после солнечной вспышки, в частности, примерно через 22 часа.

Согласно полученным данным со снимков, радиус облачных частиц С.О. варьируется в широких пределах от 20 до 60 нм, что соответствует данным исследования [38].

Далее следует проследить тенденцию изменения температуры мезосферы в период максимума и минимума показателей параметров воздушных частиц С.О. с 22.57 UTC 23.05.2021 г. до 00.32 UTC, 05.17 UTC 24.05.2021г. Для расчета температурных профилей будет взято среднее значение $F_{10.7}=75,64$ за май месяц для города Апатиты Мурманской области, с координатами 67° с.ш., 33° в.д. с показателями уровней Ар-индексов, соответствующие выбранным датам, по данным сайта космической погоды [28].

Сравнение данных температуры и плотности воздуха на высотах 50-120 км с 22.57 UTC 23.05.2021 г. при $A_p=3$ до 00.32 UTC, 05.17 UTC 24.05.2021г. при $A_p=2$ и средних значениях $F_{10.7}=76$ (75,64) с помощью эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00.

Таблица 5.

Н, км	Темп. Мезосферы, К/23.05 за 22.57 UTC	Массовая плотность возд. г/см³/ 23.05 за 22.57 UTC	Темп. Мезосферы, К/24.05 за 00.32 UTC	Массовая плотность возд. г/см³/ 24.05 за 00.32 UTC	Темп. Мезосферы, К/24.05 за 05.17 UTC	Массовая плотность возд. г/см³/ 24.05 за 05.17 UTC
50	279,0	1,190E-06	279,3	1,196E-06	278,5	1,196E-06
55	268,8	6,690E-07	269,0	6,728E-07	269,0	6,703E-07
60	255,3	3,710E-07	255,2	3,738E-07	258,6	3,688E-07
65	240,0	2,005E-07	239,3	2,022E-07	246,5	1,992E-07
70	222,9	1,047E-07	221,9	1,054E-07	230,9	1,055E-07
75	202,2	5,270E-08	201,5	5,293E-08	208,6	5,491E-08
80	175,1	2,505E-08	175,8	2,499E-08	177,6	2,709E-08
85	156,8	1,018E-08	158,4	1,016E-08	155,9	1,128E-08
90	154,6	3,524E-09	156,5	3,557E-09	150,5	3,920E-09
95	174,5	1,135E-09	175,8	1,163E-09	166,1	1,244E-09
100	209,4	4,014E-10	208,4	4,174E-10	197,9	4,226E-10
105	236,3	1,713E-10	232,0	1,789E-10	232,8	1,683E-10
110	257,8	8,089E-11	252,3	8,358E-11	269,5	7,582E-11
115	295,0	3,901E-11	292,8	3,937E-11	316,5	3,697E-11
120	353,1	1,968E-11	357,2	1,950E-11	374,7	1,951E-11

Согласно полученным данным можно проследить тенденцию изменения плотности воздуха и температуры мезосферы, в том числе в области образования С.О. Для наглядности следует рассмотреть данные изменения на графике:

График профилей температуры мезосферы за 23-24.05.2021г.

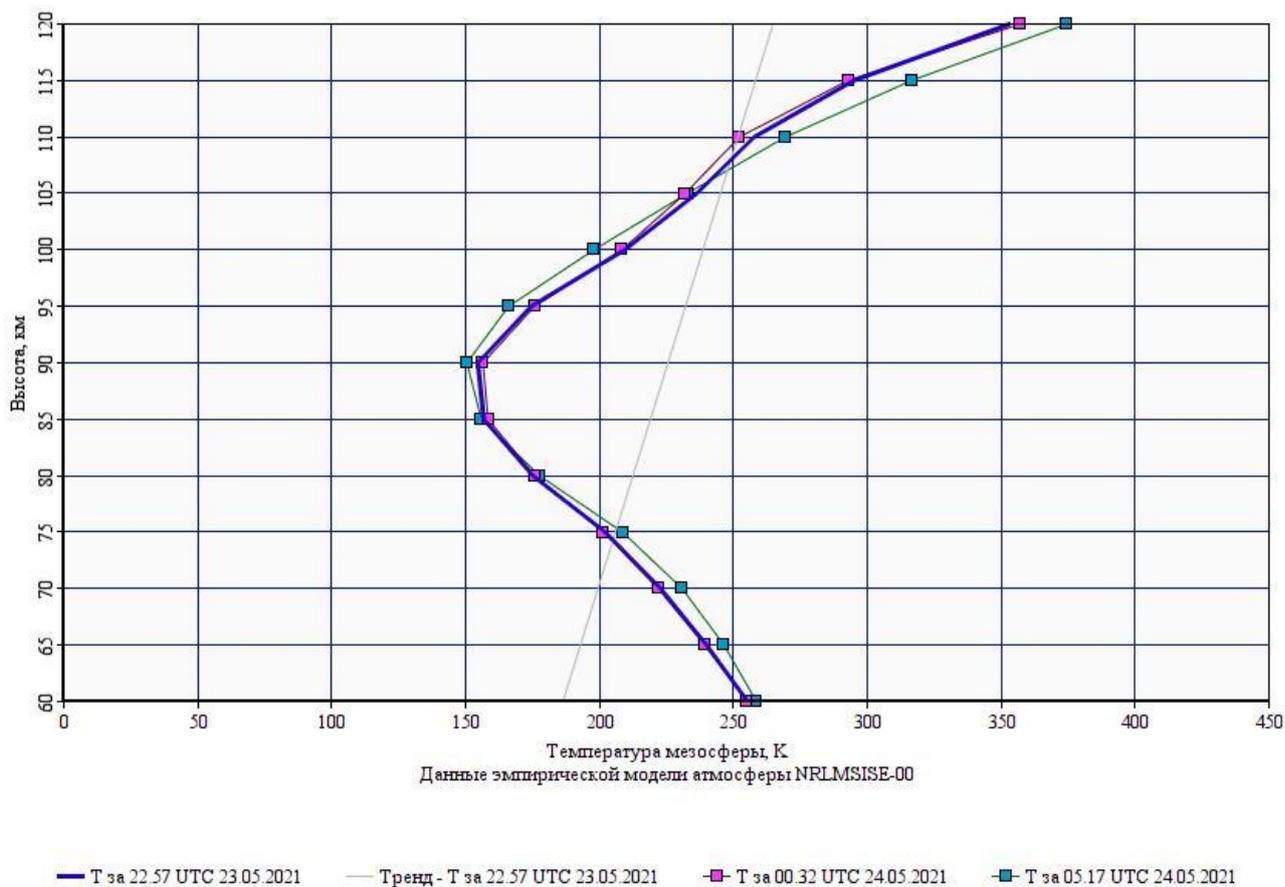


Рис. 17. Графики температурных профилей для мезосферы для 00.00 UTC по выбранным датам.

На данном графике хорошо видно, что температура в мезосфере и термосфере в 22.57 UTC 23.05.2021г. была выше, и после 00.32 UTC 24.05.2021г. стала опускаться. Разница температур мезосферы между максимумом в 22.57 UTC и минимумом в 05.17 UTC составила 0,9°K для высоты 80 км, 4,1°K для высоты 85 км и 8,4°K для 90 км. Здесь вывод может быть следующим – разница температур увеличивается с подъемом до высот нижней термосферы. Можно утверждать, что после ослабления влияния ионизации на область мезосферы и мезопаузы температура начинает опускаться на небольшой показатель значений.

При столь небольших перепадах температурных значений водяной пар, выделившийся вследствие активной ионизации данной области и увеличения интенсивности испарения, обводнения и ряда описанных выше фотохимических реакций, способствует скачкообразному образованию большего

числа ледяных кристаллов С.О., что способствует видимому и фиксируемому спутниковой аппаратурой разрастанию поля С.О.

Чтобы подтвердить видимую на снимках поля С.О. тенденцию, рассмотрим случаи влияния мощных солнечных вспышек на условия увеличения поля С.О. в течение лета 2021 г.

При этом следует отметить, что увеличение поля С.О. после максимума шло на спад, и возрастало снова через несколько дней. Этот процесс может свидетельствовать о накоплении в верхних слоях атмосферы, в частности, в мезосфере, большого объема возбужденного молекулярно-атомарного газового состава, подпитываемого характерным для летнего времени

уровнем солнечного излучения. рассматривать

Рассмотрим последствия вспышки 26 мая. Согласно [28], вспышка 26.05 была ниже уровнем (C=7) и имела четыре максимума активности 17.15, 18.30, 20.30, 21.35 (Рис.18).

После вспышки происходит скачкообразное увеличение поля С.О., но в данном случае тенденция получается не столь явная.

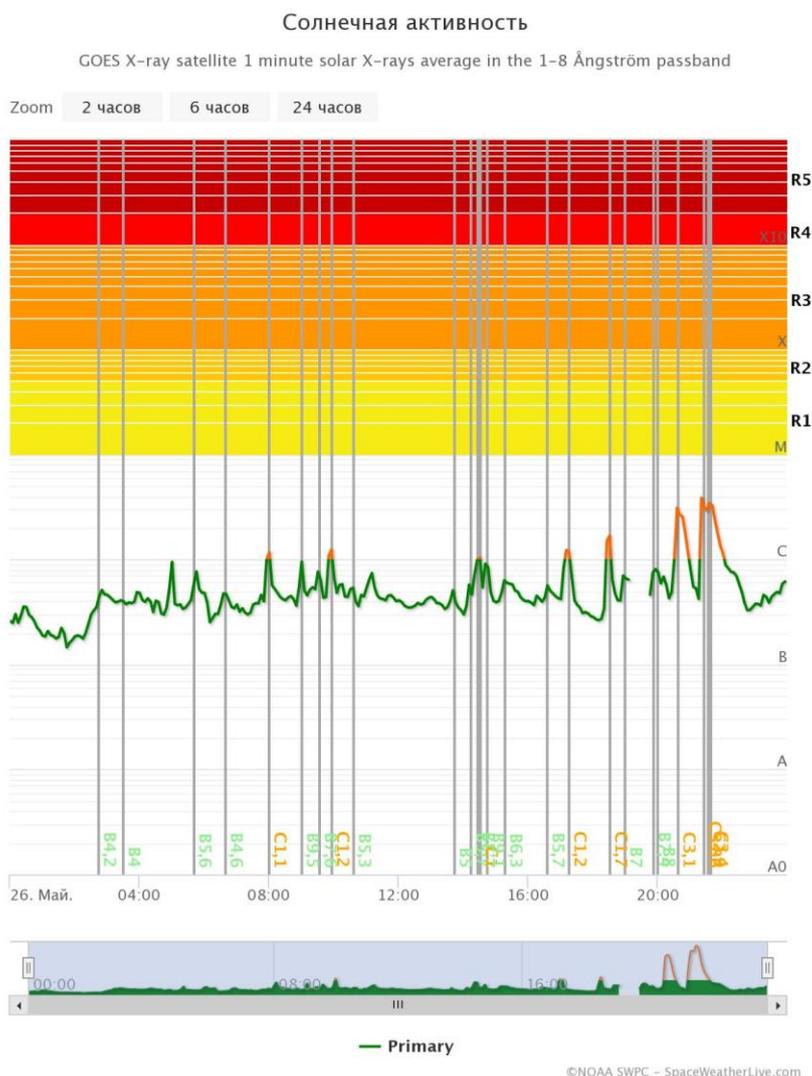
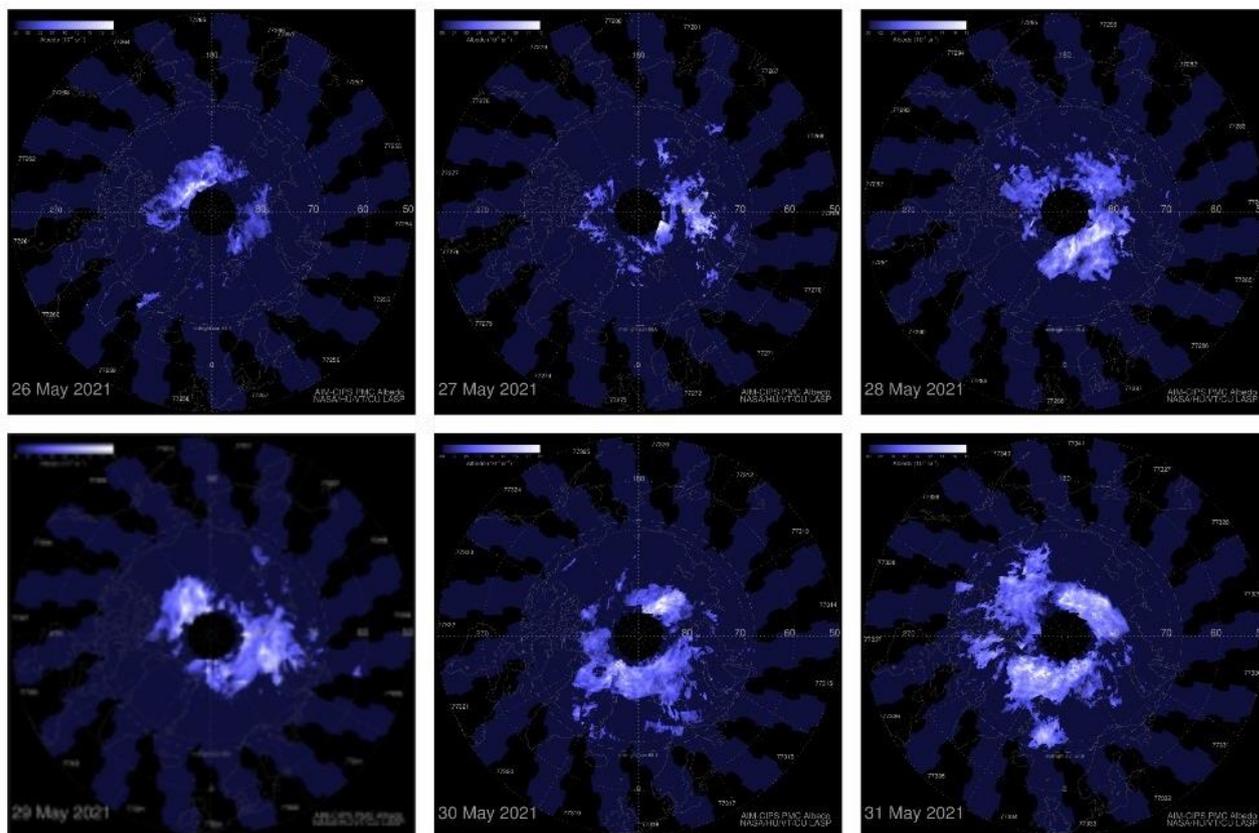


Рис. 18. Уровень солнечной активности за 26.05.2021г [28].

Рассмотрим снимки микрофизических параметров и видимого поля С.О. [43]. Видно, что после вспышки 26.05 изменения поля С.О. стали происходить с неким запозданием (Рис.19).



Тенденция изменения поля С.О. по данным аппарата AIM после вспышки 26.05.2021г.

Рис.19. Изменение поля С.О. после двух вспышек 22.05 и 26.05.2021г.

На Рис.19 мы видим, что увеличение плотности и объема поля С.О. произошло не через сутки и не скачкообразно, как в случае со вспышкой 22.05.2021г., а постепенно, начиная с увеличения альbedo части поля С.О. 27.06. Интенсивный рост поля С.О. и увеличение его альbedo начался с 28.05 и продолжился до 31.05.2021г. Тенденция роста поля С.О. в начале июня 2021 г. также сохранялась.

Такой вариант развития поля С.О. можно объяснить накоплением зарядов в области верхней мезосферы, поддержанием их количества благодаря интенсивности солнечного излучения, астрономически характерного для летнего периода времени.

Поэтому необходимо рассмотреть профиль температуры мезосферы за 27.05, 28.05, 30.05 за 00.00 UTC, т.к. именно на это время приходится максимум концентрации облачных частиц С.О., при среднем значении $F_{10.7}=75,64$ за май месяц для города Апатиты Мурманской области, с координатами 67° с.ш., 33° в.д. с показателями уровней Ар-индексов, соответствующие выбранным датам, по данным сайта космической погоды [28].

Сравнение данных температуры и плотности воздуха на высотах 50-120 км за 00.00 UTC 27.05.2021 г. при $A_p=14$, за 28.05.2021г. при $A_p=2$, за 30.05.2021г. при $A_p=5$, и средних значениях $F_{10.7}=76$ (75,64) с помощью эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00.

Таблица 6.

Н, км	Темп. Мезосферы, К/27.05 за 00.00 UTC	Массовая плотность возд. г/см ³ / 27.05 за 00.00 UTC	Темп. Мезосферы, К/28.05 за 00.00 UTC	Массовая плотность возд. г/см ³ / 28.05 за 00.00 UTC	Темп. Мезосферы, К/30.05 за 00.00 UTC	Массовая плотность возд. г/см ³ / 30.05 за 00.00 UTC
50	280,0	1,217E-06	280,2	1,214E-06	280,6	1,227E-06
55	269,8	6,858E-07	270,0	6,844E-07	270,5	6,916E-07
60	255,5	3,821E-07	255,6	3,817E-07	255,9	3,864E-07
65	239,0	2,073E-07	239,0	2,072E-07	238,9	2,101E-07
70	221,2	1,081E-07	221,0	1,081E-07	220,6	1,096E-07
75	200,4	5,422E-08	200,1	5,418E-08	199,5	5,494E-08
80	173,3	2,560E-08	173,1	2,553E-08	171,9	2,589E-08
85	154,5	1,032E-08	155,2	1,025E-08	153,4	1,034E-08
90	151,1	3,538E-09	153,8	3,504E-09	151,5	3,497E-09
95	168,3	1,121E-09	175,4	1,117E-09	172,7	1,098E-09
100	202,6	3,822E-10	211,9	3,956E-10	210,3	3,818E-10
105	241,7	1,532E-10	236,2	1,718E-10	239,9	1,623E-10
110	282,2	7,001E-11	254,0	8,180E-11	263,5	7,699E-11
115	329,4	3,502E-11	292,6	3,887E-11	304,1	3,732E-11
120	385,1	1,892E-11	356,4	1,927E-11	366,1	1,901E-11

Согласно полученным данным, температура мезосферы в области 85-95 км меняется не значительно, оставаясь в пределах -130°C . Напротив, тенденция изменения плотности воздуха мезосферы 30.05 стала сильно увеличиваться до высоты 85 км, далее существенно снижаясь к высотам 120 км. Для наглядности следует рассмотреть данные изменения с помощью графика (Рис.20).

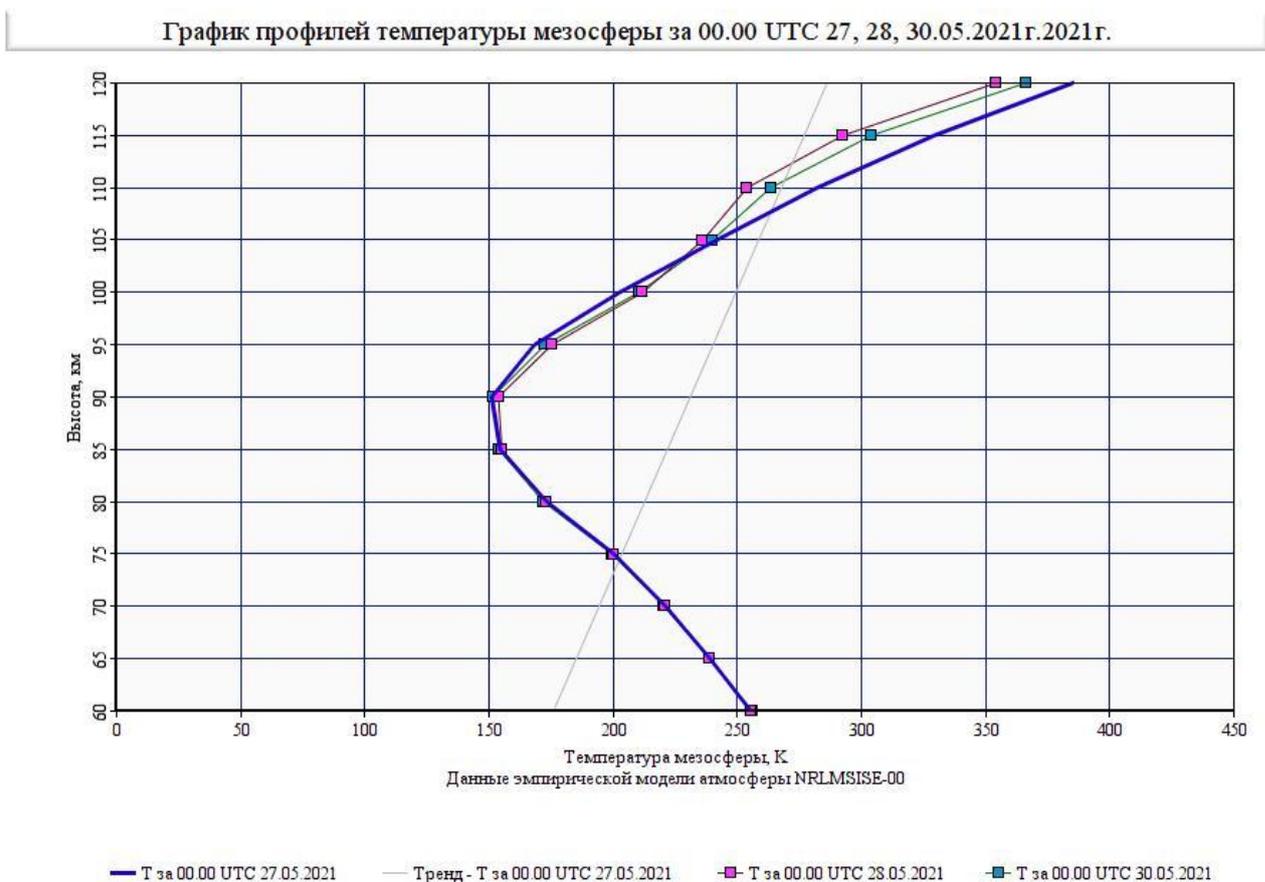


Рис.20. Тенденция изменения температурных профилей мезосферы за 00.00 UTC

По графику мы видим более наглядно тенденцию изменения температурных профилей мезосферы в выбранные даты. Мы видим, что скачкообразный рост температуры наблюдается на высотах больше 100-105 км и возрастает к термосфере. Это можно объяснить скачком уровня ионизации термосферы и попадания ионизированных частиц и атомов газов в область мезопаузы и верхней мезосферы. В области образования поля С.О., 85-95 км, также наблюдается рост температуры, но не значительный,

который сменяется ее падением начиная с 00.00 UTC через 2 суток после солнечной вспышки.

Из проведенного анализа видно, что температура мезосферы в области образования С.О. меняется незначительно. Поскольку микрофизической причиной увеличения плотности вещества, поля С.О. и его альbedo является комплекс факторов, обуславливающих особенности области верхней мезосферы и мезопаузы, незначительные синусоидальные изменения профилей температуры мезосферы следует отнести к причинам усиления процесса испарения и обводнения, т.е. к одной из причин периодического таяния льда, испарения водяного пара в большем количестве и обводнения большего числа электрически заряженных ядер конденсации.

Этот вывод коррелирует с активацией известных микрофизических и физико-химических атмосферных процессов, приводимых в движение солнечной активностью – процесс активной ионизации верхних слоев атмосферы, попадания большого количества ионизированных частиц в область нижней мезопаузы и верхней мезосферы, передача зарядов частицам ядер конденсации с последующим их обводнением и кристаллизацией вследствие нахождения частиц в поле экстремально низких температур в области летней мезосферы.

По результатам проведенного анализа температурных профилей мезосферы в период интенсивной солнечной вспышки мы видим, что ее наличие предсказуемо приводит к росту поля С.О. и его альbedo, чему способствует рост числа заряженных ядер конденсации и рост интенсивности их обводнения. По таблицам и графикам видно, что высотный диапазон наиболее вероятного возникновения С.О. в исследуемые даты сужен до 85-95 км. Выше 95 км температура существенно увеличивается, что исключает вероятность появления там ледяных кристаллов С.О. вследствие большей вероятности их испарения. Ниже уровневой отметки 80 км температура также является достаточно высокой, что позволяет предположить возможность образования наибольшего объема С.О. только в слое 85-95 км.

Тем не менее, нельзя исключать возможность присутствия отдельных компонентов поля С.О. на больших и меньших высотах до достижения ими температурных отметок с положительными значениями или значениями, близкими к положительным.

§3.4. Сравнение данных

В данной работе планировалось также проведение сравнения карт барической топографии поля тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500 ввиду увеличения солнечной активности и разрастания поля С.О. Сравнение проводилось по времени 00.00 UTC и в даты, следующие за увеличением поля С.О., т.е. через двое суток после солнечной вспышки, визуальным методом – 24.05, 28.05, 10.06, 30.06, 06-07.07, 11.07, 02-03.08.

При сравнении изменений карт барической топографии визуальным методом явных изменений не выявлено. Однако, Бронштейн, впервые сделавший сравнение этих параметров, выявил нерегулярную, но существующую тенденцию между высотой и мощностью барических образований тропосферы и структурой поля С.О., связанную с распространением мощных гравитационных волн из тропосферы в мезосферу. Измерение физико-химических и физических параметров мезосферы и тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500 в исследовании [1] и в данной работе не проводилось – для этого требуется больше данных, которые планируется собрать и обработать в последующих научных работах. Это является одним из главных пунктов проведения дальнейшего планируемого исследования.

Заключение

Изучение термосферы, мезосферы, поля С.О. и процессов ионизации на больших высотах имеют огромное практическое значение для науки будущего. Выявление тенденций изменения микрофизических и метеорологических параметров позволяет нам увидеть более комплексную картину атмосферных процессов и их взаимосвязи с солнечной и космической погодой, как части единой глобальной космической системы. Эти знания позволяют нам по эмпирической тенденции определить предстоящие изменения атмосферы как единого физико-химического объекта, с большей уверенностью и минимальной заблаговременностью для создания эффективных прогнозов атмосферной погоды.

Сформулируем основные выводы нашего исследования. Целью данной научной работы было выяснить наличие или отсутствие корреляции солнечных вспышек и увеличения поля С.О. в связи с увеличением количества заряженных частиц ядер конденсации, а также наличие или отсутствие изменений барического поля тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500 ввиду увеличения солнечной активности и разрастания поля С.О. Для достижения цели были выполнены следующие задачи:

1. Был проведен обзор теории и практики изучения области мезосферы и мезопаузы и особенностей появления и развития С.О. на основе российских и зарубежных источников. В результате мы получили комплексное представление об основных физико-химических свойствах мезосферы, о процессах, влияющих на область в.а., мезосферы и мезопаузы, об известных на данный момент времени особенностях С.О., об особенностях, проблемах и перспективах их изучения.

2. Был проведен сравнительный анализ зависимости солнечных вспышек и увеличения поля С.О. по данным спутниковых снимков NASA (AIM), а также наличия или отсутствия изменений барического поля тропосферы на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500 по датам, соответствующим

появлению крупных солнечных вспышек и последующему скачкообразному разрастанию поля С.О.

3. Был проведен расчет зависимости упругости давления насыщения от кривизны и электрических зарядов капель.

4. Была проведена графическая обработка и анализ экспериментальных данных температуры разных высот мезосферы и мезопаузы, полученных при работе с эмпирической моделью атмосферы NRLMSISE-00 для выявления тенденции температурных изменений и высотного диапазона образования С.О.

Следует отметить, что работы, планируемые в рамках исследования, были выполнены, цели и задачи данного исследования достигнуты, получены следующие выводы.

Проанализированы процессы ионизации, ассоциации и диссоциации молекул и атомов газов в области верхней мезосферы и мезопаузы, что подтверждает наличие физического процесса электронного возбуждения атомов О на данных высотах. Эти процессы также способствуют зарядению ядер конденсации и образованию большого числа обводненных ледяных частиц С.О.

Если в тропосфере конденсация происходит на растворимых ядрах гигроскопичных соединений, на высотах мезосферы и мезопаузы, при практически в 10 раз более низком давлении, обводнение может происходить иначе – частицы ядер конденсации или тяжелые ионы (тяжелее молекулы) должны быть заряженными, и поэтому к ним присоединяется водяной пар.

Солнечная вспышка и, соответственно, приход солнечного излучения в земную атмосферу способствует стремительному росту числа заряженных ядер конденсации, что приводит к скачкообразному увеличению поля С.О. Согласно расчету, проведенному по формуле Томсона в §3.2 данной работы, размер ядер конденсации для частиц С.О. составил $0,4 \cdot 10^{-7}$ нм. При таких размерах размер частиц С.О. вполне может составлять от 0,1 до 1,5 мкм, что соответствует данным исследований [22].

В §3.3 проведены расчеты температурных показателей с помощью эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00 [26], построены температурные графики для определения высотного диапазона появления С.О. через сутки после солнечных вспышек в летний период 2021г. в соответствии со спутниковыми снимками поля С.О. по данным аппарата AIM [43]. Определено соответствие увеличения поля С.О. с датами солнечных вспышек примерно с суточным интервалом (~22ч) около 00.00 UTC, а также выявлена тенденция предполагаемого процесса накопления заряда на высотах мезосферы после солнечных вспышек, подкрепляемого постоянным притоком солнечного излучения в мезосферу в летний период. Этот вопрос необходимо будет проверить в дальнейшей научной работе с использованием анализа большего количества микроструктурных данных и данных солнечной активности, учитывая показатели протонных штормов и др.

В §3.4, согласно выводам В.А. Бронштейна [1], проведено визуальное сравнение поля С.О. и барического поля тропосферы по данным ИС «Синоптик-прогнозист» [46] на высотах АТ-100, АТ-300, АТ-500 с целью обнаружения вероятных изменений поля С.О. в следствие углубления и роста барического поля тропосферы. От результатов визуального сопоставления и выявления существующей видимой тенденции зависит актуальность проведения дальнейшего исследования этой связи. В результате были получены выводы – существенных изменений морфологической структуры поля С.О. в соответствии с ростом или углублением барического поля тропосферы на выбранных высотах практически не обнаружено. Однако, поскольку соответствие было выявлено, следует изучить вопрос корреляции мезосферных и тропосферных барических изменений в будущем, учитывая физические особенности исследуемых воздушных сред с применением расчетов и соответствующих атмосферных моделей.

В будущем планируется использовать результаты данной работы для проведения более детального исследования влияния солнечной активности на верхнюю атмосферу Земли и на процессы, происходящие в средней и

нижней атмосфере, в частности, в барическом поле тропосферы на разных высотах.

Интересным пунктом исследования верхней мезосферы и С.О. можно считать учет влияния звуковой коагуляции – воздействия ультразвуковых и инфразвуковых волн на мельчайшие частицы метеорной и космической пыли. Звуковые воздействия создают интенсивную вибрацию частиц, увеличивая число их столкновений, что способствует их сцеплению друг с другом и укрупнению (агломерации) [25]. Подобный эффект, предположительно, может существовать на исследуемых высотах вследствие проникновения в среду данных видов звуковых волн, и его также можно рассмотреть в качестве одного из возможных факторов, влияющих на укрупнение частиц космической и метеорной пыли, служащих ядрами конденсации, и частиц С.О., находящихся на разных стадиях обводнения.

Вполне возможно, что ионизация является причиной возникновения в атмосфере не только разнообразных химических реакций, протекающих достаточно стремительно на разных высотах верхней атмосферы Земли. Можно предположить, что ионизация верхней атмосферы служит также одной из причин появления атмосферных волн, создавая возмущения электро-магнитного поля Земли и передавая мощный электрический заряд его силовым линиям, что также необходимо проверить в рамках отдельного исследования.

Список источников

1. Бронштейн В.А., Гришин Н.И. Серебристые облака. М.: Изд-во Наука, 1970 г. – 360 с. с илл.
2. Jeffrey M. Forbes. Wave Coupling and Nonlinear Interactions in the Atmospheres of Earth and Mars. *Quarterly Physics Review*, Vol. 3, Issue 3, October 2017. – KEI Journals.
3. Н.Н. Перцев, П.А. Далин^{2,3}, В.И. Перминов. ВЛИЯНИЕ ПОЛУСУТОЧНЫХ И ПОЛУМЕСЯЧНЫХ ЛУННЫХ ПРИЛИВОВ НА ОБЛАСТЬ МЕЗОПАУЗЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОКСИЛЬНОГО СЛОЯ И СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ. ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, 2015.
4. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П. Атмосферное электричество. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2019. – 226 с.
5. Исследование механизмов образования электронно-возбужденного синглетного кислорода и свечения Атмосферных полос O₂ в нижней полярной ионосфере. Кириллов А.С. Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия. 2021.
6. Gattinger et al., 1996, *Ann. Geophys.*, v.14, p.687.
7. Llewellyn et al., 1999, *Ann. Geophys.*, v.17, p.913.
8. Errera, Q., Chabrillat, S., Christophe, Y., Deboscher, J., Hubert, D., Lahoz, W., Santee, M. L., Shiotani, M., Skachko, S., von Clarmann, T., and Walker, K.: Technical note: Reanalysis of Aura MLS chemical observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 13647–13679, <https://doi.org/10.5194/acp-19-13647-2019>, 2019.
9. Комаров В.С. Аэрономия верхней атмосферы. Учебное пособие. Л., изд. ЛГМИ, 1991. – с.188.
10. Хвостиков И.А. Высокие слои атмосферы. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1964. – с. 567.
11. Yuh-Lang Lin. *Mesoscale dynamics*. – Cambridge University Press, New York, 2007, 646.
12. Чунчузов И.П., Куличков С.Н., Попов О.Е., Перепелкин в.г., Зайцева Д.В., Сомсиков В.М. Волновые возмущения атмосферного давления и скорости ветра в тропосфере, связанные с солнечным терминатором. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2021, том 57, №6, с.665-679.
13. Ишков В.Н., Кононович Э.В. Солнечная активность. Журнал «Вселенная и мы», 1993, №1, с. 22-27.
14. Мартынюк В.С., Темуриянц Н.А., Владимирский Б.М. У природы нет плохой погоды: космическая погода в нашей жизни. – Киев: Издатель В.С. Мартынюк, 2008. – 212 с.

15. Гальперин Ю.И. Полярные сияния в магнитосфере, М., 1975; Космическая геофизика, пер. с англ., М., 1976.
16. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Изд-во «Мысль», 1973. – 349.
17. Перенос энергии и количества движения акустическими волнами в атмосфере. [Текст]: учебное пособие /Дробжева. – СПб.: Адмирал, 2016. – 112 с.
18. Проведение лидарных измерений с помощью комплекса Мобильного Лидара Высотного Зондирования (МЛВЗ) созданного в ФГБУ "ИПГ". Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ipg.geospace.ru/top-atmosphere.html>
19. Hervig M., Thompson R. E., McHugh M. et al. First confirmation that water ice is the primary component of polar mesospheric clouds. *Geophys. Res. Lett.*, 2001. Vol. 28. – P. 917.
20. Дмитриева М.А. Современные исследования особенностей серебристых облаков. Сборник по материалам межвузовской студенческой научной конференции «Земля и человек». – СПб.: РГГМУ, 2019.
21. Donahue T. M., Guenther B. The altitude of the scattering layer near the mesopause over the summer pole. *J. Atmos. Sci.*, 1973. Vol. 30. – P. 515.
22. Charles E. Robert et al./ Climatology of noctilucent cloud radii and occurrence frequency using SCIAMACHY. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. Vol. 71 (2009). – P. 408-423.
23. Угольников О.С. Облака и аэрозоль выше тропосферы: оптические наблюдения и новейшая история. *Косм. исслед.*, 2018 г. – 105-122 с.
24. Данилин П.А., Перцев Н.Н., Ромейко В.А. Серебристым облакам 120 лет? / *Природа*, №6, 2005. – М.: Наука, с.12-21.
25. Частицы. Способы укрупнения / *Справочник химика 21*. Химия и химическая технология. – Электронный ресурс: <https://www.chem21.info/info/932425/>
26. Эмпирическая модель атмосферы NRLMSISE-00. – Электронный ресурс: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>
27. Мировой центр данных по солнечно-земной физике. – Электронный ресурс: http://www.wdcb.ru/stp/geomag/indices_description.ru.html#КрарАр
28. Сайт космической погоды. – Электронный ресурс: <https://www.spaceweatherlive.com/ru.html>
29. Солнечная активность. В.Н. Ишков, Э. В. Кононович. *Вселенная и Мы*. Вып. №1. – М.: Наука, 1993. с.22-27. –

- Электронный ресурс:
http://crydee.sai.msu.ru/Universe_and_us/1num/v1pap4.htm
30. Космическая погода и ее влияние на распространение радиоволн: Учебное пособие/ И.Д. Козин, И.Н. Федуллина. АУЭС. Алматы, 2012, - 80 с.
 31. Солнечно-земные связи и космическая погода. /Под редакцией А.А. Петруковича. гл. 8 в кн. Плазменная гелиогеофизика, М.- Наука- 2008.
 32. Чукин В.В. О корреляции между потоком космических лучей и количеством облаков // 3-я Международная научно-практическая конференция «Качество науки - качество жизни», Тамбов, 26-27 февраля 2007 г. Сборник научных докладов. – Тамбов: ОАО «Тамбовполиграфиздат», 2007. – С.102-103.
 33. Гибсон Э. Спокойное Солнце. - М.: Мир, 1977. - 408 с.
 34. Подгорный И.М., Подгорный А.И. Ускорение солнечных космических лучей и их распространение в межпланетной среде. Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity, pp. 93-98, 2015 © Kola Science Centre, Russian Academy of Science, 2015.
 35. Мировой центр данных по Солнечно-Земной физике. Геофизический центр Российской Академии Наук. Электронный ресурс:
http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_proton_events.ru.html
 36. Исследования влияния солнечной активности на глобальное влагосодержание атмосферы и интенсивность осадков. Аль Тамими Мутанна Абдулкарим. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – СПб.: РГГМУ, 2016.
 37. Савиных В.П., Цветков В.Я. Исследование серебристых облаков. – Информационные технологии в науке, образовании и управлении, №3. – М.: 2019.
 38. Регулярная и нерегулярная изменчивость температуры и характеристик серебристых облаков в области среднеширотной мезопаузы. Перцев Н.Н. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29. – физика атмосферы и гидросферы. – М.: ФГБУН ИФА им. А.М. Обухова РАН, 2015.
 39. Основы химии окружающей среды: учеб пособие. В 3 ч. Ч. 1. Химические процессы в атмосфере / Е.П. Гришина; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006 – 68 с.
 40. О дальнем и сверхдальнем распространении коротких волн. Краснушкин П. Ионосфера и ее свойства. РАДИО № 3. 1982 г. Электронный ресурс
<https://m.qrz.ru/solar/articles/hfprognoz.shtml>

41. Semenov A.I., V.V. Bakanas, V.I. Perminov, Yu.A. Zheleznov and Yu.V. Khomich (2002) The near infrared spectrum of the emission of the nighttime upper atmosphere of the Earth. *Geomagnetism and Aeronomy*, 42(3), 390-397.
42. Thermospheric temperature and density variations. Hitoshi Fujiwara, Yasunobu Miyoshi, Hidekatsu Jin, Hiroyuki Shinagawa, Yuichi Otsuka, Akinori Saito and Mamoru Ishii. *Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets Proceedings IAU Symposium No. 264, 2009.* – p. 310-321.
43. Сайт лаборатории атмосферы и физики космоса NASA, США, Колорадо. Данные со спутника AIM. Электронный ресурс: <https://lasp.colorado.edu/aim/browse-images.php?dataset=pmc>
44. Ромейко В.А. Руководство по наблюдению серебристых облаков. – М.: Наука, 2015.
45. Васильев О.Б., Гришин Н.И. Инструкция для наблюдений серебристых облаков, *Астрономический календарь. Постоянная часть «Наука»*, 1973.
46. Руководство по эксплуатации МАЮВ.466456.005-003 РЭ ИС «Синоптик-прогнозист». ФГБУ «ГЛАВНАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ИМ. А.И. ВОЕЙКОВА». – Росгидромет, 2019.
47. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / Под ред. А.И. Бедрицкого. – СПб.; Москва: Летний сад, 2008. – Т.1: А–И. – 336 с.
48. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / Под ред. А.И. Бедрицкого. – СПб.; Москва: Летний сад, 2009. – Т.2: К–П. – 312 с.
49. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / Под ред. А.И. Бедрицкого. – СПб.; Москва: Летний сад, 2009. – Т.3: Р–Я. – 216 с.
50. Задачник по общей метеорологии. Бройдо А.Г., Зверева С.В., Курбатова А.В., Ушакова Т.В. – Ленинград.: Гидрометеоздат, 1984 г. – 311 с.