



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Анализ вариации полей атмосферного озона по спутниковым данным»

Исполнитель Парфенов Евгений Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

«__» ____ 2020 г.

Санкт-Петербург
2020

Оглавление

Сокращения.....	3
Введение.....	4
1. Физико-химические процессы, протекающие в атмосфере и магнитосфере при высыпании EPP	4
1.1 Химические процессы.....	4
1.2 Физические процессы	9
2. Высыпания энергичных электронов в атмосферу Земли и их регистрация.....	20
3. Практические расчеты и анализ полученных данных	22
4. Результаты.....	26
Основные выводы	37
Заключение.....	38
Литература	39

Сокращения

UARS — Upper Atmosphere Research Satellite

HALOE — Halogen occultation experiment

ENVISAT — Environmental Satellite

MIPAS — Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding

GOMOS — Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars

EPP - Energetic Particle Precipitation - высыпание энергетических частиц

УФ — ультрафиолет

СКЛ — солнечных космических лучах

ГКЛ — галактические космические лучи

NOAA — National Oceanic and Atmospheric Administration

POES — Polar Orbiting Environmental Satellite

Введение

В настоящее время исследования всех процессов, протекающих в какой-либо среде, и атмосферы в частности, носят комплексный характер. Следовательно, возникает необходимость рассмотрения совокупности процессов, воздействующих на объект исследования, объяснить физические и химические процессы, в них протекающие.

Из-за особенностей строения магнитного поля Земли, в областях полярных широт северного и южного полушария, возникают области, в которых процесс высыпания высокоэнергетических частиц, наблюдается особенно ярко. Частицы, преодолевшие сопротивление магнитного поля, проникают в атмосферу, на различные высоты, в зависимости от интенсивности их потока и энергии, которую они в себе несут. Таким образом, этот процесс вызывает усиление или ослабление химических реакций в атмосфере. Цепь химических реакций приводит к изменению концентрации атмосферного озона, а также к изменению климата.

До сих пор остается много не решенных вопросов о энергии потоков частиц, поступающих в атмосферу. Эти неопределенности, оказывают влияние на недооценку модельных измерений относительно спутниковых наблюдений озона.

Поэтому, необходимо отметить, что данная тема является актуальной и требует более детального изучения.

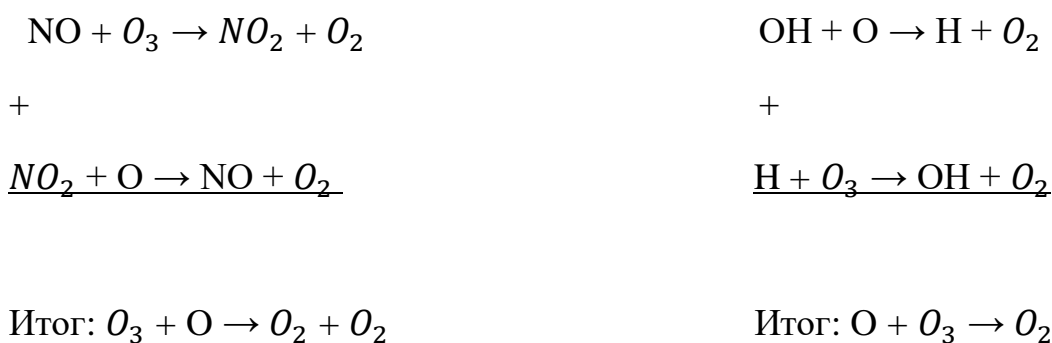
1. Физико-химические процессы, протекающие в атмосфере и магнитосфере при высыпании ЕРР

1.1 Химические процессы

Для изучения содержания озона в атмосфере, необходимо проанализировать содержание соединений, влияющих на содержание озона, в их число входят ОН и NO_2 [2].

Озоновая дыра — это локальное сокращение концентрации озона в озоновом слое Земли, расположенного на уровне стратосферы. Пороговым значением содержания озона, ниже которого регистрируется появление озоновой дыры, является 220 единиц Добсона. По общепринятой в научной среде теории, во второй половине XX века наблюдается устойчивая тенденция к значительному утончению озонового слоя.

Высыпание ЕРР приводит к интенсивному ионно-нейтральному химическому взаимодействию. Результатом этого взаимодействия является дополнительное образование молекул окиси азота NO и радикала OH, которые интенсифицируют химические каталитические циклы разрушения озона.



В проведенных ранее исследованиях были также получены количественные оценки эффективности образования дополнительных озоноразрушающих веществ, представленных выше: 1,25 молекул NO и 2,0 радикала OH (на каждую пару образующихся в атмосфере ионов) [2]. Таким образом, был обоснован новый механизм солнечно-земных связей. Эти оценки реализации численных сценариев воздействия протонных вспышек на Солнце на озоносферу Земли ранее не применялись на практике, из-за сложного численного моделирования. Однако, с развитием возможностей численного моделирования, работы с этим методом были возобновлены.

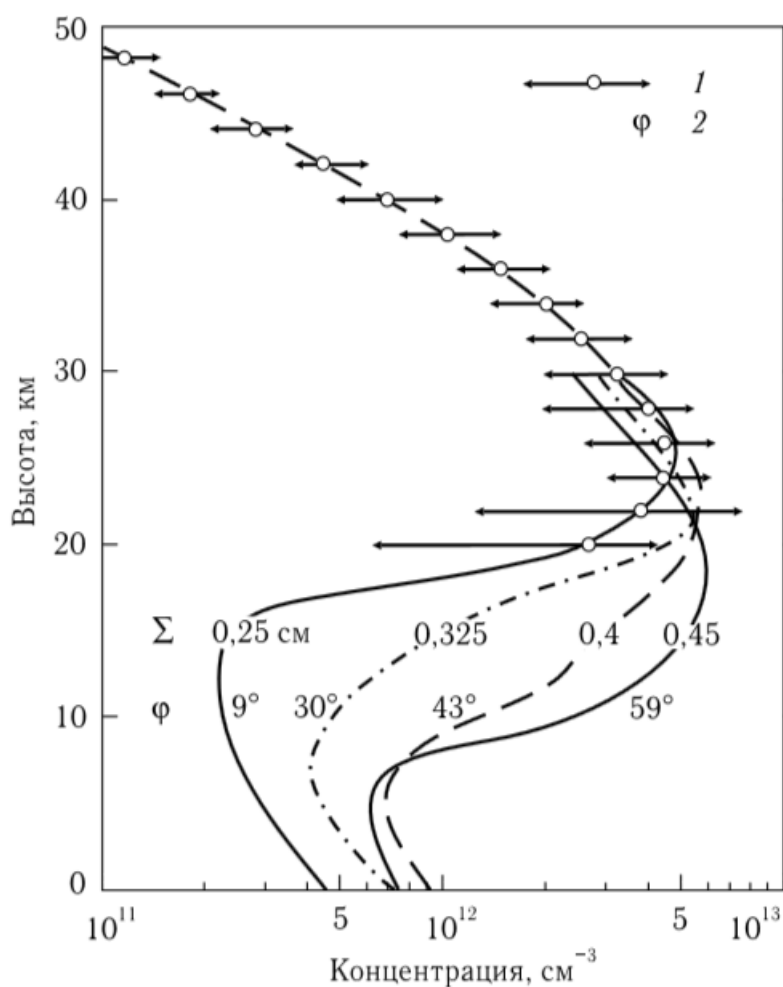


Рис.1.1 - Вертикальные профили концентрации озона (1), измеренные на различных широтах (2) [1].

На рис. 1.1 изображены вертикальные профили вариации концентрации атмосферного озона с высотой, на различных широтах.

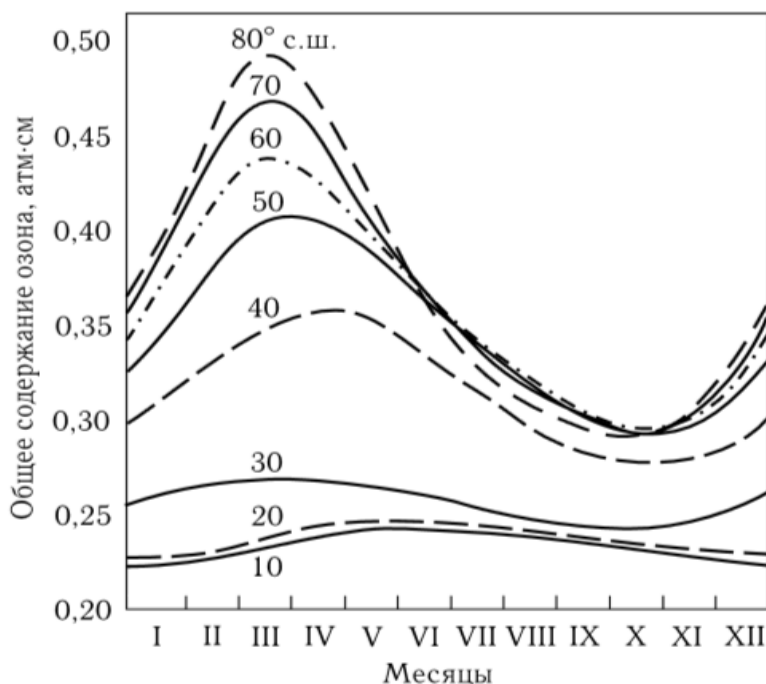
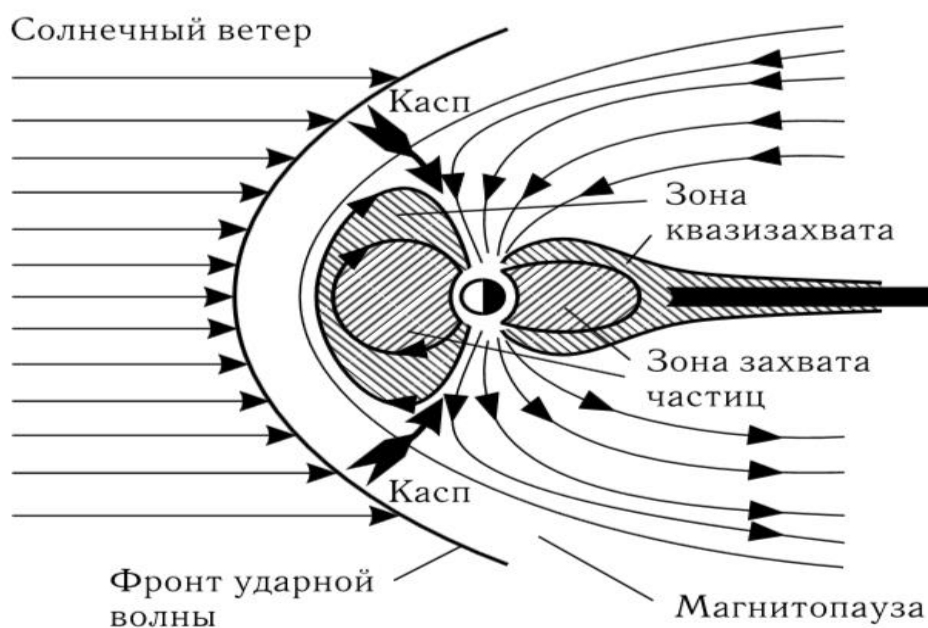


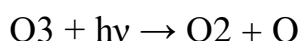
Рис. 1.2 - Годовой ход общего содержания озона на различных широтах [1].

На рис. 1.2 представлен годовой ход общего содержания озона на разных широтах в соответствии с наблюдениями. На основе данных, рис. 1.1 и 1.2 можно сделать вывод, что наибольшая концентрация озона наблюдается в зимне-осенний период, а также в полярных широтах.



1.3 - Строение магнитосферы Земли в плоскости, проходящей через магнитные полюсы Земли и линию Земля–Солнце [3].

При наблюдениях солнечного спектра было установлено, что спектр Солнца ослаблен в диапазоне длин вол УФ (240–320 нм.) [7]. Это явление вызвано поглощением озоном испускаемой энергии, в результате чего происходит диссипация озона и восстановление одноатомных и двухатомных молекул кислорода. Физическая схема образования озона была впервые предложена С.Чепменом в 1930 г. [6].



В летний период, в присутствии УФ-радиации, потери O_3 при высыпании энергетических частиц, восполняются в результате обратных реакций, описанных выше:



Поэтому высыпания ЕРР сглаживаются из-за ультрафиолетовой радиации и достоверно определить зависимость изменение концентрации озона от высыпания энергетических частиц. С развитием спутниковых технологий, источники данных об атмосфере и частицах, испускаемых Солнцем и космическим пространством, влияющих на магнитосферу и атмосферу Земли, значительно продвинулись вперед, вывели наши знания на новый уровень в понимании процессов, происходящих в цепочке Солнечно-Земных связей. Данные, полученные с искусственных спутников Земли, изучающих атмосферу Земли, например, таких как: (UARS — прибор HALOE; ENVISAT — приборы MIPAS, GOMOS), подтвердили теоретические расчеты процессов в цепочке солнечно-земных связей.

1.2 Физические процессы

Исследуемым физическим фактором является солнечная активность, к таким её проявлениям относятся:

1) Солнечные пятна.

2) Фотосферные и хромосферные явления, связанные с пятнами: тонкая структура хромосферы, факелы, хромосферные вспышки, их излучение в далекой УФ-области спектра, рентгеновские лучи, области радиочастот, а также выброс корпускул, включая космические лучи).

3) Протуберанцы, которые по положению и свойствам занимают промежуточное место между хромосферой и короной.

4) Возмущения в короне над солнечными пятнами, связанные с протуберанцами, и солнечными пятнами.

Из всего разнообразия этих явлений рассмотрены только те из них, которые оказывают влияние на земную атмосферу: это солнечные пятна как характеристики долгопериодных и короткопериодных вариаций солнечного УФ-излучения а также фотосферные и хромосферные явления, хромосферные вспышки и выбросы корпускул являющиеся источником таких явлений как солнечный ветер и космические лучи. Для количественной характеристики различных происходящих на Солнце изменений применяются различные индексы солнечной активности. Первым индексом солнечной активности было число солнечных пятен на видимом диске Солнца, которое позволило открыть 11-летний цикл солнечной активности [13]. Затем было введено относительное число солнечных пятен, или число Вольфа [14], определяемым формулой:

$$W = k(10g + f),$$

где g — число групп пятен на видимом диске, f — общее число пятен. Первые солнечные пятна цикла образуются на сравнительно

высоких широтах. Средняя широта образования пятен уменьшается в течение цикла до тех пор, пока пятна не оказываются в конце цикла на широтах вблизи экватора. Период этих циклических вариаций составляет приблизительно 11 лет. Магнитная активность обнаруживает 22-летнюю повторяемость, называемую циклом Хейла [15]. Кроме 11–22-летнего циклов пятен существует и «вековой» (80–90-летний) цикл. Среднемесячная полная площадь всех солнечных пятен на видимом полушарии Солнца A в любой заданный момент времени коррелирует с числом солнечных пятен W [16]:

$$A = 16,7W.$$

Солнечная активность и такие её проявления, как, например, вспышки или корональные выбросы, которые являются различными процессами деятельности звезды, неизменно сопровождаются выбросами большого количества энергии и испусканием высокоэнергичных протонов, электронов и нейтронов. Достигают Земли протоны, имеющие энергию от единиц МэВ и более, а также электроны с энергиями от десятков кэВ. Поэтому, как было сказано ранее, из всех явлений солнечной активности рассматриваться будут только те, мощность которых, позволяет частицам, а именно протонам и нейтронам, проникать в атмосферу Земли. В солнечных космических лучах - СКЛ энергии протонов ограничиваются обычно долями ГэВ, иногда достигая нескольких ГэВ. Интенсивность СКЛ падает с увеличением энергии резче, чем у галактических космических лучей - ГКЛ. На основе данных спутника GOES [5], можно сделать вывод, что интенсивность потока солнечных протонов в различных энергетических диапазонах во время солнечного протонного события - СПС увеличивается, достигает максимума и затем происходит спад продолжительностью от одного до нескольких дней. Потоки протонов, исходящих от Солнца, делятся на два класса:

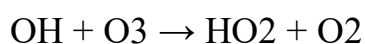
1. Релятивистские протоны

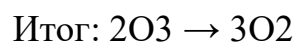
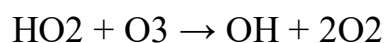
2. Нерелятивистские протоны

Наличие устойчивой связи между количеством солнечных пятен и частотой протонных событий, создает условия, в которых дать достоверный прогноз их возникновения, а тем более частоты и интенсивности, невозможно. Однако, наблюдения, представленные в работе [10], дают возможность говорить о том, что явления, связанные с солнечными вспышками, происходят чаще в максимуме солнечной активности. Во время пика активности Солнца могут регистрироваться около 8 и более событий за год с энергией более 10^7 Эв [2]. В период, когда Солнечная активность сходит к минимуму, обычно происходит не более одного события за год. Влияние вспышки на атмосферу Земли зависит от потока энергии в ней и от жесткости спектра [2]. Эти параметры определяют ионизацию высокоширотной атмосферы. Высокоэнергичные протоны ($E > 30$ МэВ) проникают в стратосферу, частицы с меньшей энергией влияют на мезосферу.

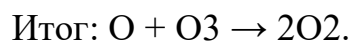
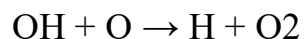
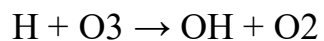
Первичные процессы столкновения с участием N_2 , O_2 и O приводят к образованию оксидов азота на высотах мезосферы и верхней термосферы (70–150 км). Соединения оксида азота перемещаются в стратосферу ниже 45 км тем самым, разрушая озон в каталитических циклах [3]. Поэтому образование соединений азота, при их дальнейшем перемещении в атмосфере, может приводить к разрушению озона, поэтому необходимо провести исследование влияния данного фактора.

Также, помимо вышеуказанных реакций, озон нижней стратосферы и тропосферы разрушается в одном из водородных циклов разрушения:





Выше высоты в 55 км эффективны следующие водородные циклы разрушения озона (нечетного кислорода):



Поэтому наряду с соединениями азота, необходимо проводить оценку

Озон задействуется в результате радиационного нагрева, а также охлаждения. Следовательно, озон является неотъемлемой частью атмосферной циркуляции, воздействуя на области вплоть до тропосферы [3].

Строение современной атмосферы

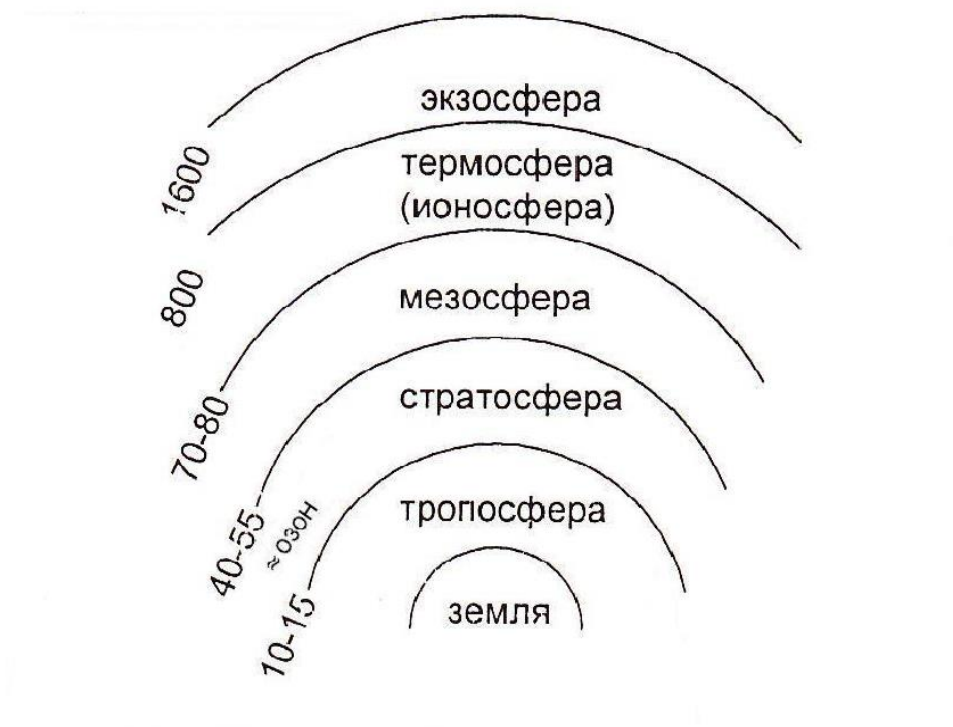


Рис. 1.4 – Строение атмосферы Земли

Атмосферу Земли можно разделить на следующие слои:

- *Тропосфера* – нижний слой атмосферы, верхняя граница в разных широтах находится на разных высотах: в полярных широтах достигает высоты в 8-10 км, в умеренных широтах – 10-12 км, а в тропиках – 16-18 км, причем зимой ниже, чем летом. В данном слое сосредоточена основная масса атмосферного воздуха – около 80 %, а также основная масса водяного пара – около 90%. В тропосфере происходит рефракция радиоволн, поэтому распространение земных радиоволн напрямую зависит от того, в каком состоянии находится тропосфера.

- *Стратосфера* – слой атмосферы, который следует за тропопаузой, он характеризуется повышением температуры с высотой, в отличие от тропосферы. В нижнем слое стратосферы, до высоты около 20 километров находится изотермическая область, в ней температура практически не меняется с высотой, а далее с высотой температура начинает повышаться, наблюдается инверсия, что связано с поглощением ультрафиолетовых лучей находящемся на данной высоте озоновым слоем, вначале повышение происходит медленно, а на высоте около 34 – 35 километров – быстрее. На высоте около 40 километров температура достигает 0 град. По Цельсию и остается постоянной до высоты около 55 километров. Эта область, в которой температура остается неизменной, имеет название – стратопауза. В данном слое проходит граница между стратосферой и мезосферой. Плотность воздуха в стратосфере в сотни раз меньше, чем в тропосфере, она сильно убывает с высотой. В стратосфере располагается озоновый слой, который является защитным экраном для всего живого на земле, поскольку поглощает ультрафиолетовые лучи, которые пагубно влияют на биосферу, он же и определяет верхний предел жизни на Земле. Озон образуется в атмосфере за счет фотохимических реакций, которые происходят в слое около 30 километров над уровнем моря, хотя озоновый экран равномерно сосредоточен в достаточно толстом слое атмосферы, который составляет около 40 километров (нижняя граница – 15-20 километров, верхняя граница – 55-60 километров над уровнем моря), суммарная толщина всего озонового слоя, сосредоточенного на одном уровне составляет 2,0-4,0 миллиметра. Несмотря на столь незначительную толщину озоновый слой поглощает большую часть коротковолнового ультрафиолетового излучения солнца, длина волны которого составляет от 180 нанометров до 200 нанометров, в данном слое происходит изменение энергии коротковолновой радиации. Эти

лучи оказывают существенное влияние на магнитные поля Земли, под их действием происходит распад молекул, ионизация воздуха, образуются новые газы и различные химические элементы. Эти процессы вызывают различные явления, которые можно видеть с земли, в их числе северные сияния, которые чаще всего можно наблюдать в высоких широтах южного и северного полушарий, зарницы и прочие свечения в атмосфере. В данном слое под воздействием радиации, приходящей с Солнца, происходит ионизация молекул газа, они диссоциируют на отдельные атомы. В стратосфере практически отсутствует водяной пар[2].

- *Мезосфера* – слой атмосферы, который располагается на высоте от 50 километров до 80-90 километров, следующий за стратосферой, который характеризуется сильным понижением температуры воздуха. Наибольшее значение температура принимает на нижней границе мезосферы, где заканчивается стратосфера, и достигает значения 0 град. По Цельсию. Далее с высотой температура сильно понижается и достигает значения около -70 град. по Цельсию вблизи мезосферы, переходного слоя между мезосферой и термосферой, которая располагается на высоте около 80-90 километров над уровнем моря. Состав воздуха в данном слое практически постоянный, примерно 80 % составляет азот и около 20 % - кислород. Поэтому в данном слое активно протекают фотохимические реакции азотных соединений.

- *Термосфера* – слой атмосферы, следующий за мезосферой, который начинается на высоте от 80-90 километров и продолжается до уровня в 800 километров над уровнем моря. Рост температуры в нижней части данного слоя вызван в большей мере энергией, которая выделяется при слиянии отдельных атомов в молекулы кислорода. На высоких

широтах причиной повышения температуры является тепло, обусловленное законом Джоуля-Ленца, которое выделяется электрическими токами, имеющими магнитосферное происхождение. Далее следует переходный слой, который называется термопауза. Он характеризуется переходом к постоянной температуре, это постоянство означает что солнечная радиация – единственный источник энергии, и других источников выше не наблюдается. Его высота может изменяться в зависимости от активности Солнца, и может составлять от 400 до 800 километров над уровнем моря. На полюсах Земли, во время таких явлений, как северные сияния и магнитные бури, может наблюдаться увеличение температуры до 3000 град. по Кельвину [1][2].

- *Экзосфера* - слой атмосферы, следующий за термопаузой. Он является внешним слоем атмосферы Земли. В данном слое частицы газа рассеиваются, и атмосфера постепенно переходит в космическое пространство. Высота экзосферы варьируется от 800 до 3000 километров над уровнем моря в зависимости от активности Солнца. В данном слое наблюдается высокая температура воздушных частиц, она достигает значения в 1500-3000 град. по Кельвину, однако повышение температуры с высотой очень слабое, на всем протяжении слоя она остается практически постоянной. В экзосфере наблюдается очень сильная разреженность воздуха, содержание воздушных частиц составляет около 1000 на кубический сантиметр. Частицы газа в данном слое достигают второй космической скорости, которая равна 11 000 метров в секунду, особенно легкие частицы, преодолевая гравитацию, отрываются от атмосферы Земли и устремляются в открытый космос. Источником энергии в экзосфере является исключительно солнечная радиация, поскольку теплообмена с другими частицами не происходит [2].

Таким образом, исследуемым слоями атмосферы необходимо принять стратосферу и мезосферу. Это подтверждается исследованиями в работе [17], о которой речь пойдет ниже.

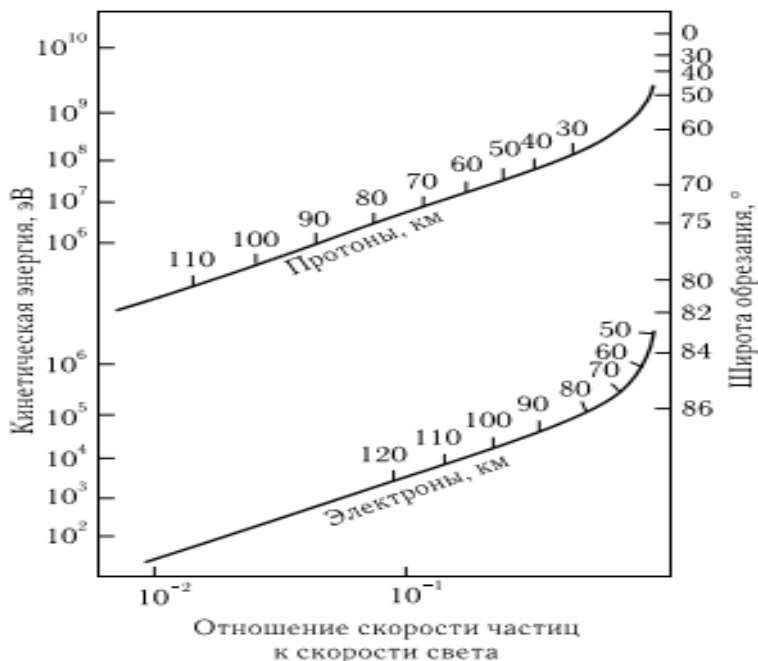


Рис. 1.5 - Зависимость высоты проникновения протонов и электронов, их энергии и широты обрезания от скорости [17]

В исследовании [17] проводилась работа, по определению мощности протонов и электронов, необходимой для проникновения в толщу атмосферы Земли, на различных широтах.

Влетая в атмосферу, энергичный протон теряет энергию из-за соударений с частицами атмосферы, сообщая им свою энергию, и оставляет за собой ионизированный след. Скорость потери энергии возрастает по мере замедления движения. В диапазоне энергий 10–200 МэВ скорость потерь почти обратно пропорциональна энергии и типичное значение при энергии 100 МэВ составляет 0,8 МэВ на каждый метр траектории при нормальных температуре и давлении воздуха.

Можно считать, что вся энергия тратится на образование ионных пар, причем энергия, необходимая для образования одной пары ионов, составляет 35 эВ. Плотность газа вдоль траектории протона, влетающего в атмосферу из космоса, возрастает, так что ионизация происходит в конце его пути. Протон с начальной энергией 50 МэВ, влетающий в атмосферу вертикально, до высоты 56 км теряет только 10% своей энергии. Последние 10% он теряет на отрезке всего в 100 м. На последнем отрезке в 2,5 км теряется половина всей первоначальной энергии. Для протонов с энергией 1–100 МэВ атмосферные эффекты наблюдаются в диапазоне высот 90–35 км (рис. 1.5). Однако с ростом энергии поток частиц слабеет, да и скорость рекомбинации сильно возрастает с уменьшением высоты, так что протоны высоких энергий оказываются не столь эффективны как можно было предположить. Тем не менее при мощных вспышках заметная ионизация может происходить на высотах менее 50 км, т.е. ниже слоя ионосферы. Важным следствием вторжения энергичных солнечных частиц является не только ионизация атмосферы, но и, как следствие ее, изменение химического состава малых газовых составляющих, в частности увеличение содержания HO и NO и уменьшение содержания атмосферного озона, о чем и идет речь в данной работе.

Всемирная климатическая программа WCRP поставила задачу включать данные об осаждении энергетических частиц в исследования химико-климатических моделей, как часть естественного солнечного воздействия на климатические системы и процессы. Для решения данной задачи открытым вопросом является правильность оценки скорости ионизации атмосферы под воздействием EPP во время и после крупных геомагнитных бурь, вызванных действием Солнца. Проведенный анализ скоростей ионизации атмосферы, предоставленный для таких модельных исследований на основе спутниковых наблюдений,

показал [4], что имеется существенная недооценка реального ускорения и потерь частиц, а также неоднородность пространственного распределения энергий по спектру. Поэтому из наблюдений на спутниках не всегда легко оценить реальные EPP-события и рассчитать ионизационные скорости корректно [8, 4].

2. Высыпания энергичных электронов в атмосферу Земли и их регистрация

Информацию о потоке и энергиях высыпающихся в атмосферу электронов из космического пространства обычно получают с помощью наблюдений со спутников, например, NOAA/POES (National Oceanic and Atmospheric Administration Polar Orbiting Environmental Satellite), либо с помощью баллонных наблюдений. С 1957 года по настоящее время Физический институт имени Лебедева (Москва, Россия) регулярно проводит баллонные измерения потоков заряженных частиц в земной атмосфере (от наземного уровня до 30-35 км) на нескольких широтах, включая регион около Мурманска. Уникальная экспериментальная база данных, полученная в течение 63 лет наблюдений энергичных частиц в атмосфере, позволяет исследовать временные, пространственные и энергетические характеристики [9].

Для данного исследования, из этих данных [9], были выбраны даты наблюдений высыпаний высокоэнергичных частиц и мощности данных высыпаний, позволяющие судить о том, когда были зафиксированы высыпания высокоэнергичных электронов в полярной атмосфере, данные частицы должны приводить к началу химических реакций образования оксида азота и гидроксильной группы, с последующим разрушением озона. В данной Таблице 2.1 приведены даты, в соответствии с датами, эксперимента MLS (Microwave Limb Sounder), предназначенного для измерений концентраций малых составляющих верхней полярной атмосферы, в число которых входят оксид азота и гидроксильная группа OH, необходимых для оценки влияния EPP на озоновый слой, в зависимости от мощности высыпания.

Таблица 2.1 – Даты высыпания энергичных электронов во время баллонных наблюдений в районе Мурманска.

День	Месяц	Год
13	10	2004
9	2	2005
7	3	2005
13	5	2005
15	6	2005
18	7	2005
16	12	2005
10	4	2006
28	6	2006
7	8	2006
28	9	2009
31	3	2010
17	12	2010
25	7	2011

Даты, отмеченные синим цветом, показали устойчивую зависимость концентрации озона и гидроксильной группы. Даты, отмеченные желтым цветом, не показали зависимости, из-за сглаживания эффекта влиянием ультрафиолетового излучения в летний период. Даты, отмеченные красным цветом, показали меньшую зависимость от высыпания ЕРР

3. Практические расчеты и анализ полученных данных

В данной работе проводится анализ химического состава полярной атмосферы в диапазоне 63-73 градусов северной широты, а также в районе города Мурманск, это связано с тем, что в это регионе расположена геофизическая станция Ловозеро, это единственная станция в Российской Федерации, где наблюдения за полярными сияниями ведутся непрерывно с 1963 года. В задачи данной геофизической станции входят работы по изучению и регистрации полярных сияний, состояния и изменения магнитного поля Земли, физические процессы, происходящие в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли.

На основе данных о концентрации групп нечетного азота и водорода, можно оценить разрушение озона под действием выпадения высокоэнергичных электронов, как было сказано выше, в главе 1.1. Исследования проводились на основе данных о концентрации гидроксильных групп OH, азотных групп NO и озона, представленных National Aeronautics and Space Administration (NASA). Для проведения исследования был выбран научно-исследовательский спутник Земли Aura, предназначенный для изучения атмосферы Земли. Спутник ведет непрерывные измерения с 15 июля 2004 года. Основной задачей спутника является контроль за изменением климата на Земле, газового состава атмосферы и состоянием озонового слоя Земли. На спутнике установлены приборы для изучения вышеуказанных характеристик. В их число входят два аппарата, которые требуются для выполнения поставленной в работе цели. HIRDLS (High Resolution Dynamic Limb Sounder) инфракрасный радиометр высокого разрешения, предназначен для измерения температуры и концентрации газовых примесей в различных слоях атмосферы. MLS (Microwave Limb Sounder) Микроволновый Радиометр, предназначен для измерения концентрации

химических соединений, влияющих на разрушение озона в различных слоях атмосферы. MLS производит измерения состава атмосферы, температуры, влажности и облачных капель и льда, которые используются для отслеживания концентрации и распределения стратосферного озонового слоя, так же эти данные помогают улучшить прогнозы погоды и изменения климата. MLS наблюдает тепловое микроволновое излучение от края атмосферы, сканируя его расстояние до 90 километров вперед вдоль направления полета космического аппарата Aura с частотой в 25 секунд. Aura имеет околополярную орбиту с высотой в 705 км. Когда Земля вращается, орбита данного спутника остается неподвижной относительно Солнца, чтобы обеспечить ежедневный глобальный охват.

Данные ресурсы были выбраны вследствие того, что:

1. В базе данных имеются данные измерений за период 2004-2006 г.
2. Спутник охватывает область регистрации высыпания EPP.
3. Данные приборы обладают малой погрешностью.
4. Высотное разрешение захватывает изучаемую часть атмосферы на высотах 50-150 километров (50-0.0001 гПа).

Целью работы является изучение отклика полярной высокоширотной атмосферы на высыпание высокоэнергичных релятивистских электронов: оценка отклика химических составляющих полярной атмосферы на высыпания высокоэнергичных электронов и их вклад в разрушение озона.



Блок-схема 3.1- Алгоритм выполнения работы

Для выполнения цели поставленной в данной работе, было необходимо провести все операции, представленные в блок-схеме 3.1

1. Необходимо было проанализировать библиографические и электронные базы данных о явлениях, изучаемых в данной работе, к ним относятся, данных о газовом составе атмосферы и явлениях высыпания ЕРР. В качестве источника данных о газовом составе был выбран архив NASA, в частности данные спутника AURA, прибор MLS. Данные о высыпаниях высокоэнергетических частиц были взяты из данных института имени Лебедева, представленные в таблице 2.1.

2. Для работы с данными архива NASA, было необходимо написать программу, для считывания файла формата .h5, который имеет сложную древовидную структура хранения данных. Для этого в программе Raportly, была изучена структура этих данных, затем в пакете

программ MatLab, была создана программа, для считывания данных и преобразования их в стандартный матричный вид.

3. В следствие того, что спутник AURA производит непрерывные измерения на различных широтах и долготах Земли, объем данных очень велик. Для выборки и обработки данных только полярных широт северного полушария, которые изучаются в данной работе, было необходимо написать программу для сортировки, выделения, осреднения интересующих данных и записи в отдельные файлы по каждому из периодов.

4. Для более детального и наглядного анализа полученных данных, было необходимо визуализировать их, так как численная оценка была весьма затруднительна.

5. Расчет отклонения концентрации озона и гидроксильной группы вовремя и после явления, относительно спокойного периода.

Результаты

После обработки данных и их визуализации проведен их анализ. На рисунках 3.1-3.4 представлены концентрации ОН, в диапазоне 63-73 градусов северной широты, на высотах 0.1-0.001 гПа.

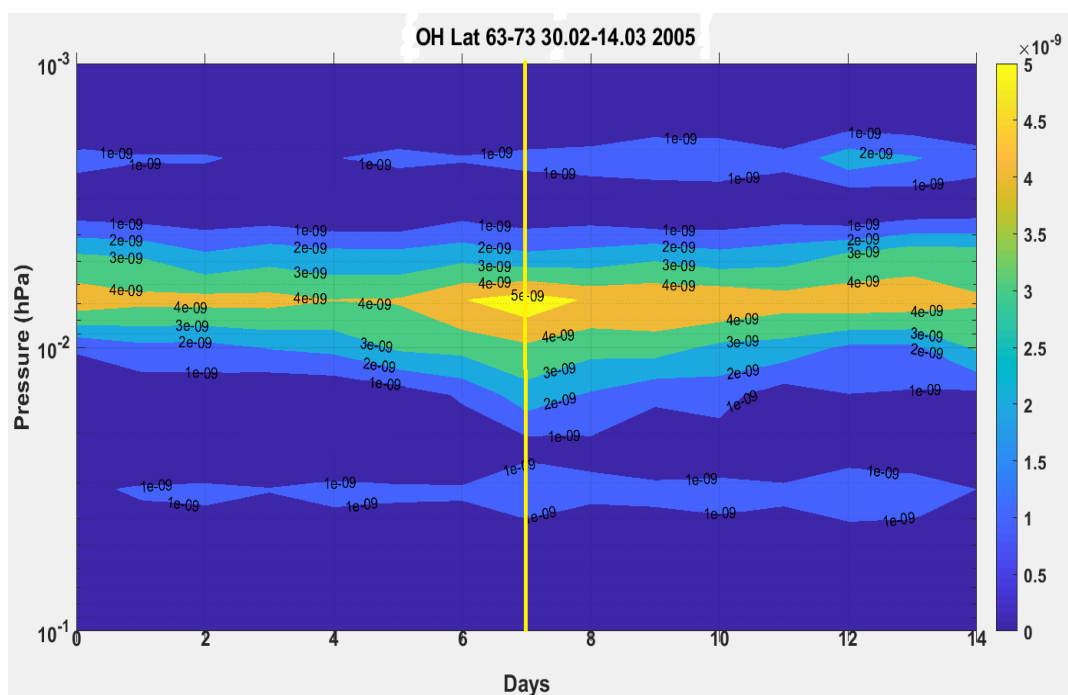


Рис. 3.1 – Концентрация ОН за период 28.01-14.02 2005г.

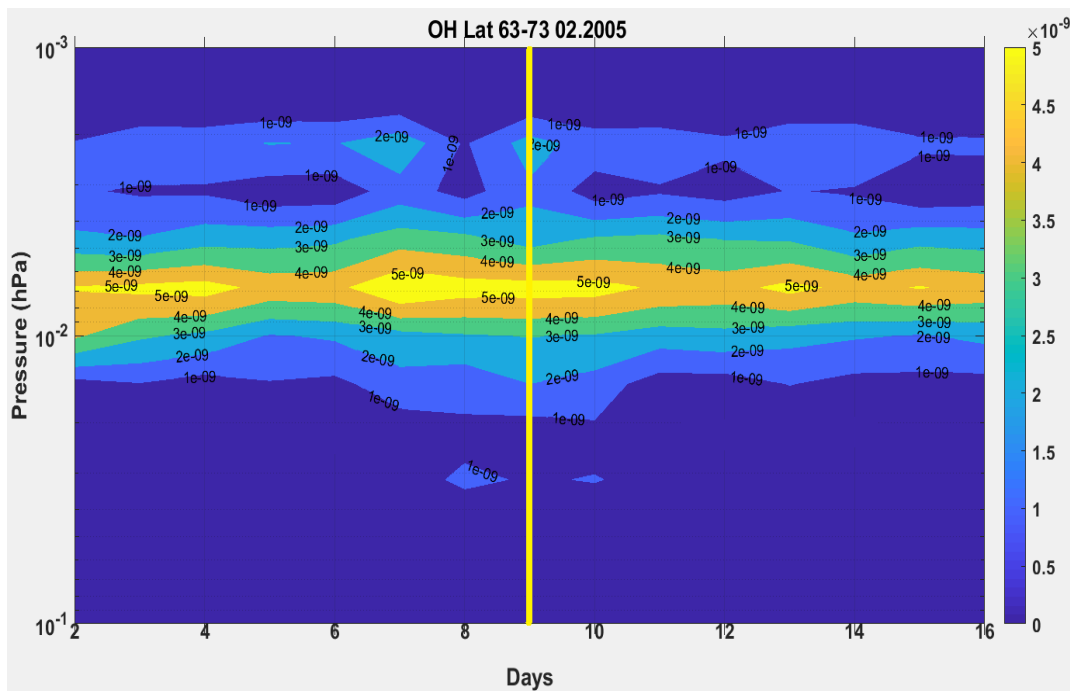


Рис. 3.2 – Концентрация ОН за период 02.03-16.03 2005г.

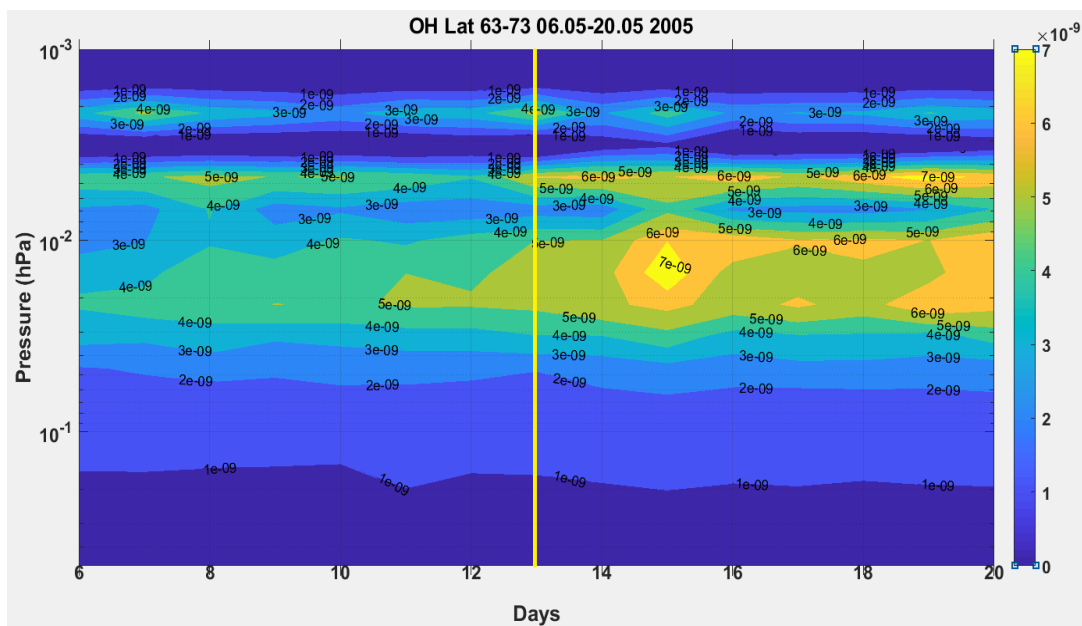


Рис. 3.3 – Концентрация ОН за период 06.05-20.05 2005г.

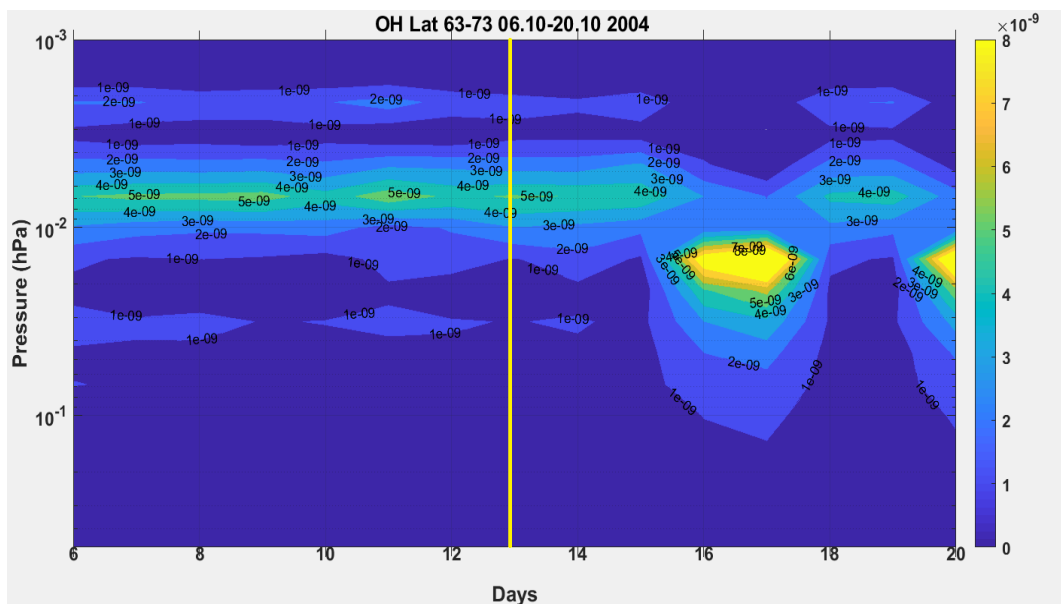


Рис. 3.4 – Концентрация ОН за период 06.10-20.10 2004г.

На всех представленных рисунках, желтой линией отмечены даты явлений высыпания высокоэнергичных частиц. Можно заметить, что до явления наблюдается относительно спокойный период, нет ярких всплесков увеличения или уменьшения концентрации. После относительно спокойного периода следует всплеск концентрации и затем плавное возвращение к спокойному периоду.

Аналогично было рассчитано отклонение концентрации NO в даты высыпания EPP, т.е. за периоды 28.01-14.02 2005г., 02.03-16.03 2005г., 06.10-20.10 2004г., 09.12.2010-24.12.2010г.

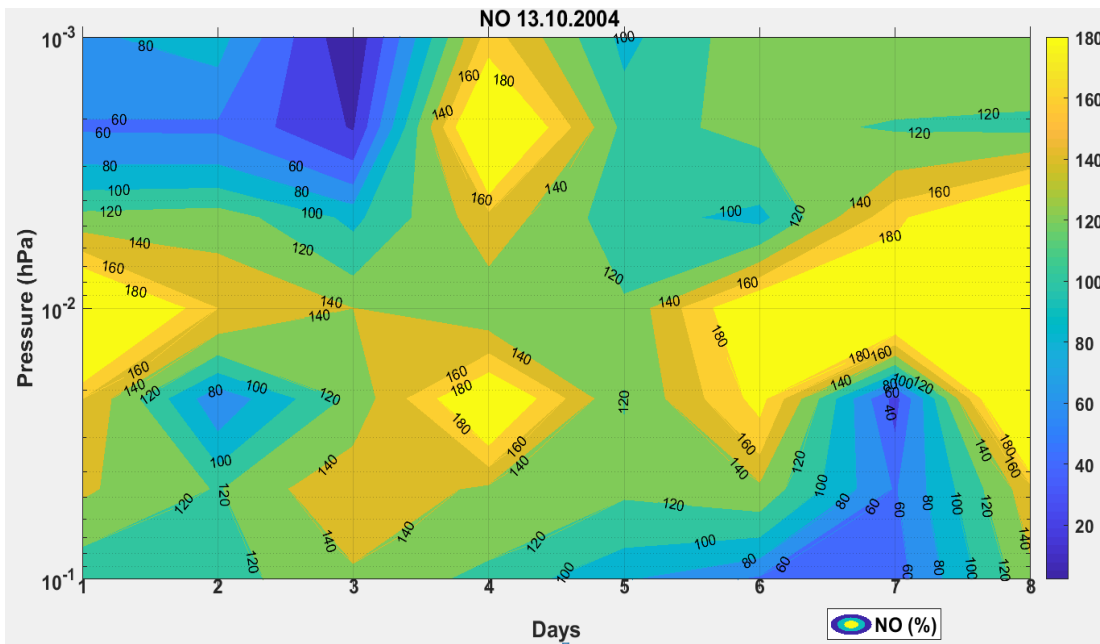


Рис. 3.5 – Процентное отклонение концентрации NO за 13.10.2004г.-
20.10.2004г. относительно спокойного периода.

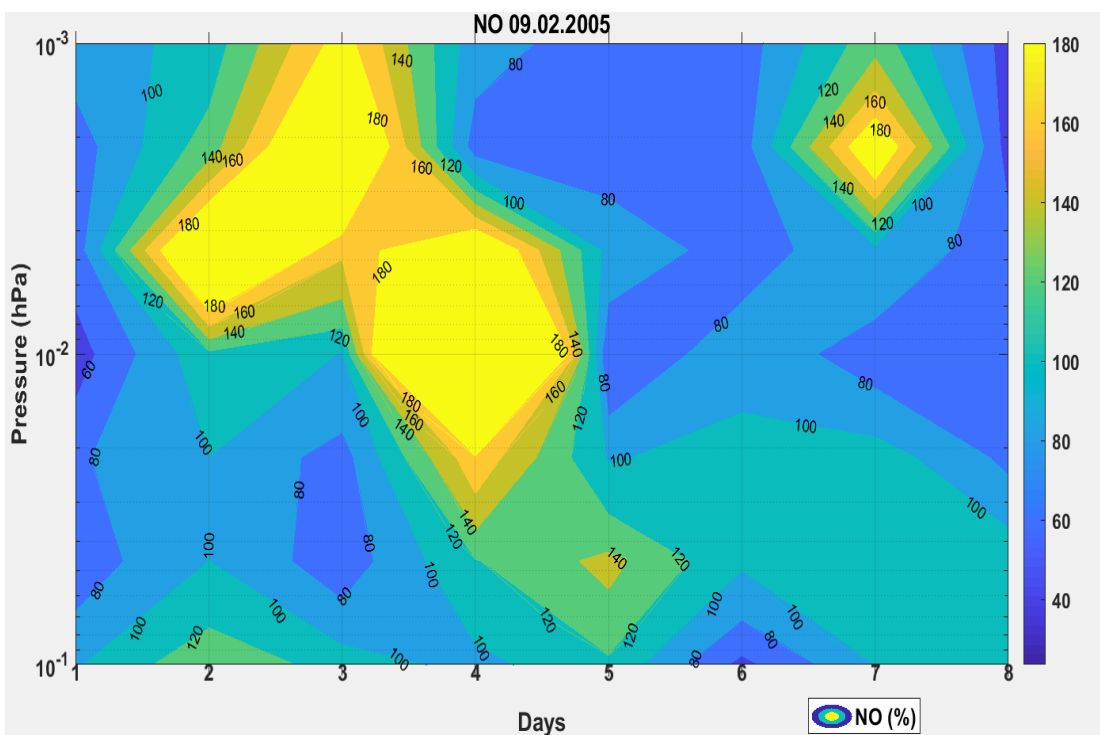


Рис. 3.6 – Процентное отклонение концентрации NO за 09.02.2005г.-
16.02.2005г. относительно спокойного периода.

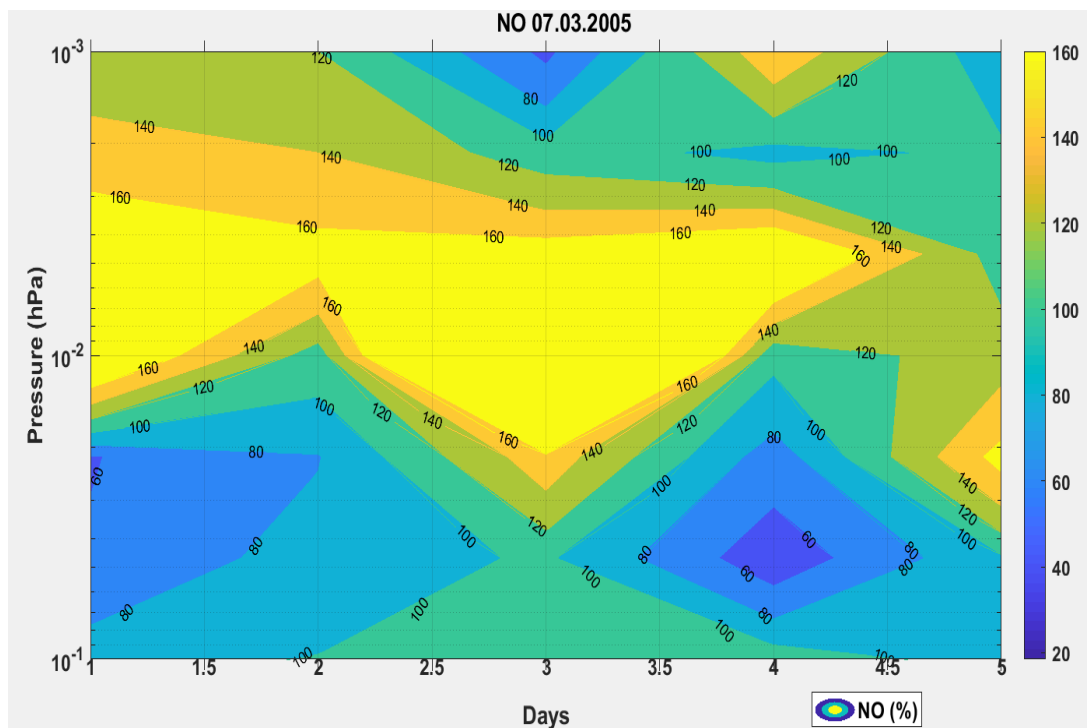


Рис. 3.7 – Процентное отклонение концентрации NO за 07.03.2005г.-
14.03.2005г. относительно спокойного периода.

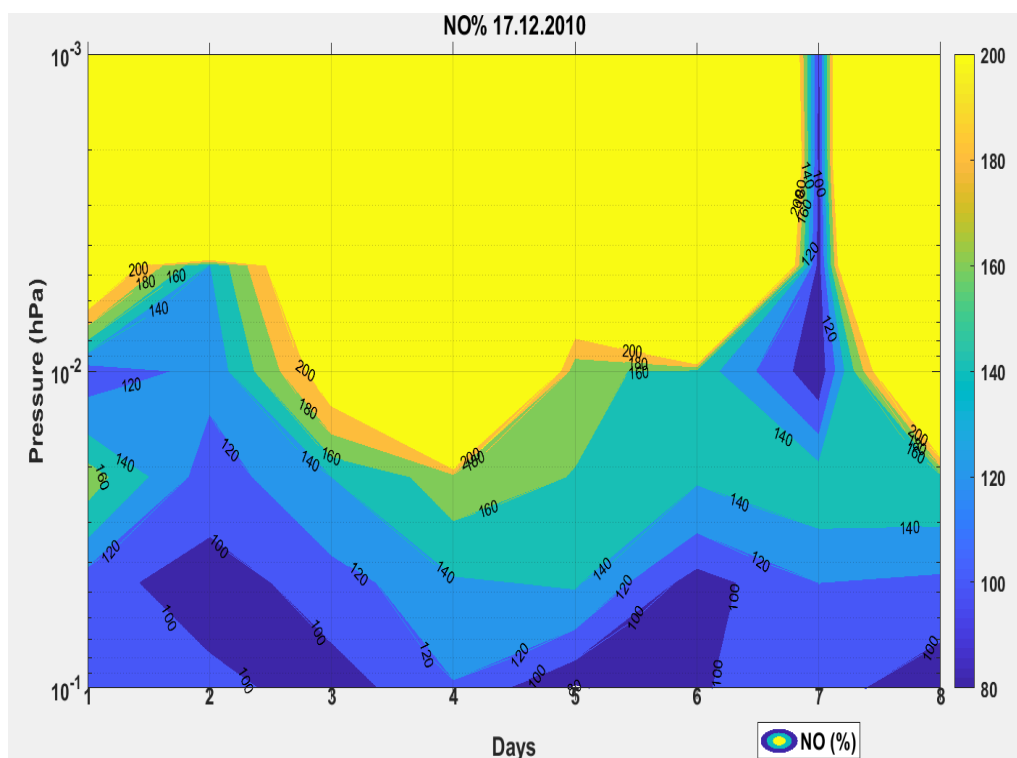


Рис. 3.8 – Процентное отклонение концентрации NO за 17.10.2010г.-20.12.2010г. относительно спокойного периода.

Так же было необходимо оценить концентрацию озона в указанные временные периоды, для оценки взаимосвязи увеличения концентрации OH и NO, вызванного высыпанием EPP и концентрацией озона.

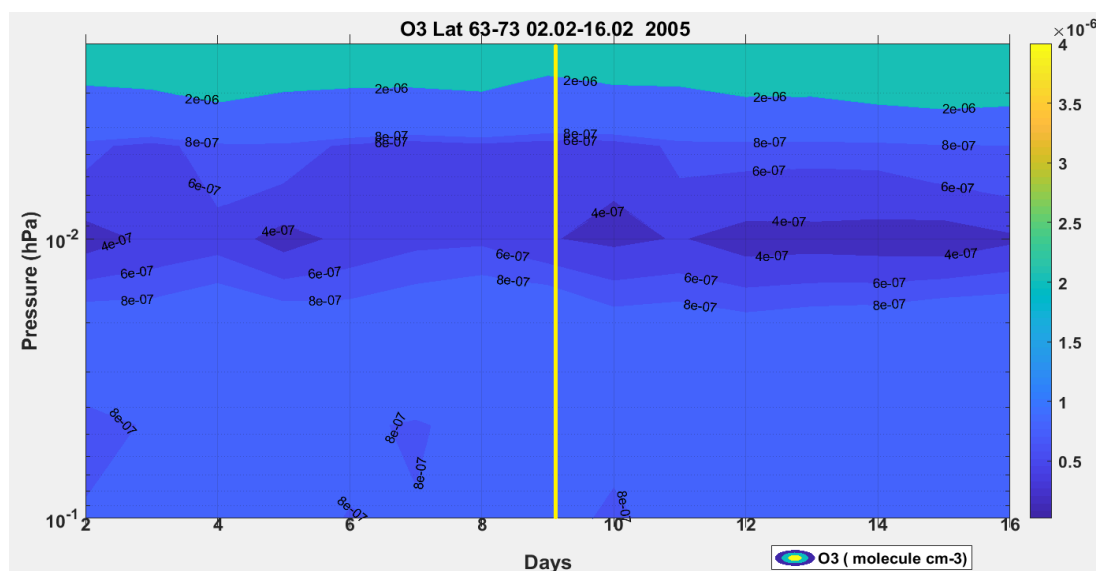


Рис. 3.9 – Концентрация O3 за период 02.03-16.03 2005г.

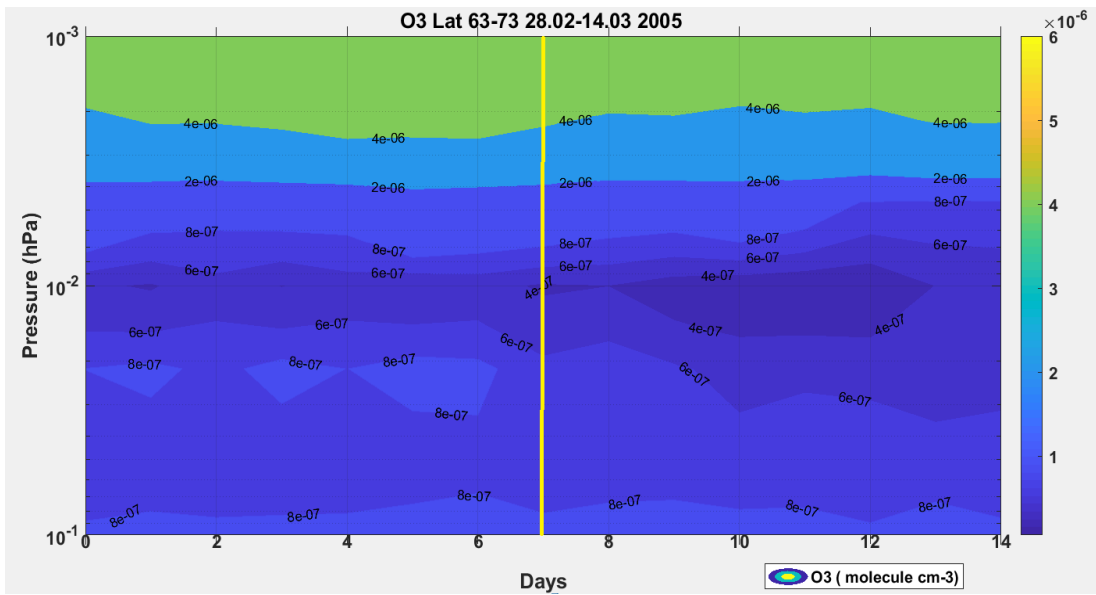


Рис. 3.10 – Концентрация O3 за период 28.01-14.02 2005г.

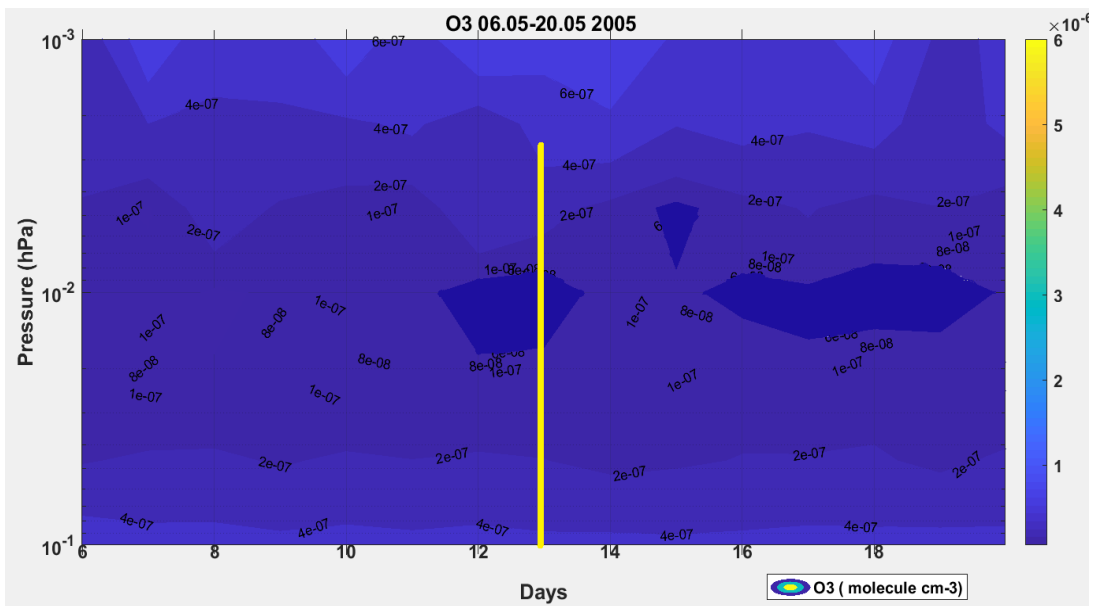


Рис. 3.11 – Концентрация O3 за период 06.05-20.05 2005г.

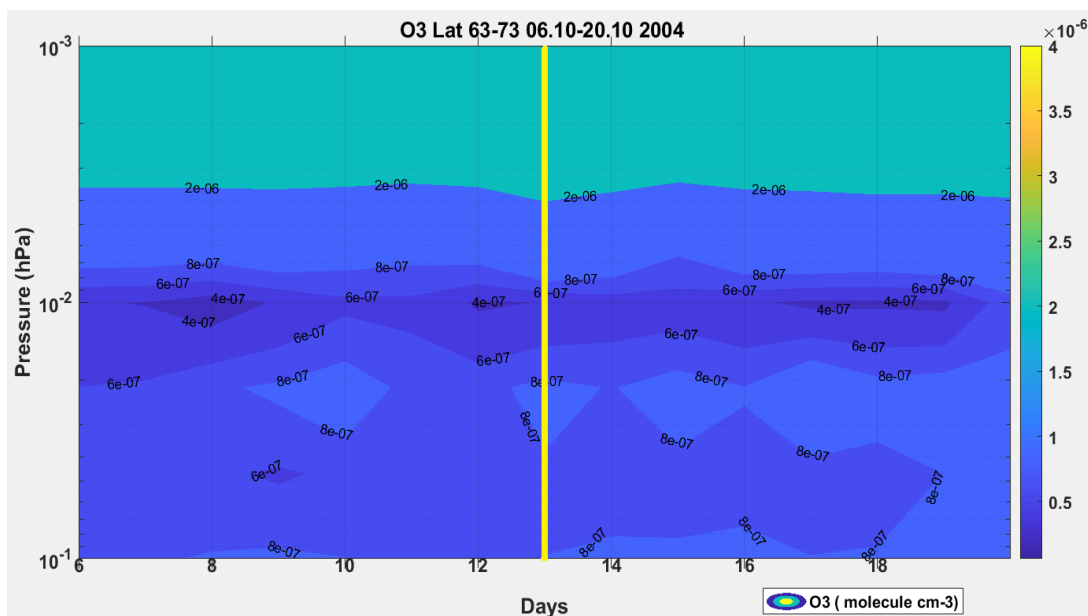


Рис. 3.12 – Концентрация O₃ за период 06.10-20.10 2004г.

Аналогично с данными по гидроксильной группе, данные по озону были взяты на высотах 0.1-0.001 гПа и том же географическом районе. Желтой линией отмечена дата регистрации высыпания EPR. После высыпания концентрация озона сокращалась пропорционально увеличению содержания OH и NO. Это вызвано реакцией разрушения, представленной в главе 1.1.

Были также обработаны данные за летний период аналогичным способом. В летний период не наблюдалось явного изменения концентрации озона, это вызвано поступлением более сильного УФ излучения, относительно зимнего периода.

Так же был проведен численный анализ. Для этого была рассчитана средняя концентрация за спокойный период (семь дней до события высыпания EPR), а затем процентное отклонение от него для дня высыпания и последующих семи дней. Такой анализ был проведен для озона и гидроксильной группы. Было проведено осреднение по всем высотам.

Таблица 4.1 - Отклонение концентрации от среднего значения
спокойного периода.

ОН								
09.02.2005	32,5	28,3	9,6	8,8	9,6	9,8	24,8	3,6
07.03.2005	36,4	27,5	23,9	20,4	10,1	20,2	21,1	20,3
13.10.2004	-0,1	10,0	6,6	60,0	77,2	30,2	32,7	68,1
13.05.2005	13,7	16,8	44,7	17,1	18,1	19,7	27,7	36,1
NO								
13.10.2004	9,0	6,1	4,1	7,0	2,9	4,2	2,2	4,6
09.02.2005	8,7	25,2	12,1	7,5	4,3	2,3	4,7	4,7
07.03.2005	16,0	8,7	7,8	3,0	2,8	2,1	1,2	0,8
13.05.2005	34,9	21,7	14,7	15,6	9,0	10,9	8,3	3,6
O3								
09.02.2005	-0,3	0,0	-1,7	-0,6	-0,5	-1,3	-1,7	-2,1
07.03.2005	1,0	-1,1	-0,3	-0,9	-2,1	3,3	-4,8	-5,3
13.10.2004	-0,8	-1,4	-2,4	-2,9	-3,6	-3,4	-3,4	-3,4
13.05.2005	-1,9	-2,5	-3,1	-3,5	-4,0	-4,6	-5,2	-5,0

Численный анализ так же показал, что после явлений высыпания энергичных частиц, концентрация ОН и NO увеличивается, что вызывает падение концентрации озона. Полученные данные подтверждают взаимосвязь высыпания ЕРР и изменения концентрации гидроксильной группы ОН, оксида азота, а также атмосферного озона.

Таблица 4.2 – Мощность высыпания ЕРР и среднее
процентное отклонение концентрации относительно спокойного
периода

	МэВ	ОН	NO	O3
13.10.2004	15,4	35,58	5,01	-2,66
09.02.2005	16,6	15,87	8,69	-1,03
07.03.2005	23,8	22,48	5,3	-1,28
13.05.2005	63,6	24,24	14,84	-3,73

В данной таблице представлены данные о мощности высыпания ЕРР и среднее отклонения концентрации исследуемых газов атмосферы, относительно спокойного периода перед явлением ЕРР. На основе представленной таблицы было необходимо провести корреляционный анализ, для выявления взаимосвязи мощности высыпания высокоэнергичных частиц и изменения концентрации газов.

В таблице 4.3 представлены коэффициент корреляции, рассчитанные по данным таблицы 4.2.

Таблица 4.3 – Коэффициенты корреляции

	МэВ	ОН	NO	O3
кэВ	1			
ОН	-0,07602	1		
NO	0,899742	-0,31616	1	
O3	-0,76432	-0,83954	-0,72409	1

Далее было рассчитано критическое значение при уровне значимости 0,05, для проверки нулевой гипотезы, полученные значения были сопоставлены с расчетными, на основе полученных данных зависимость показали коэффициенты, выделенные желтым цветом. Таким образом, устойчивая связь наблюдается между мощностью высыпания высокоэнергичных частиц и концентрацией оксида азота, а

также концентрации озона с всеми тремя параметрами, такими как, мощность EPP, концентрации оксида азота и гидроксильной группы.

Корреляционный анализ подтвердил гипотезу о связи EPP и концентрации озона, оксида азота и гидроксильной группы, так же на величину изменения концентрации влияет мощность выпадения. Таким образом, на основании данных о Солнечной активности и мощности явлений, вызванных этой активностью, можно прогнозировать изменение содержания озона в атмосфере, что в свою очередь необходимо учитывать при работе с климатическими моделями.

Основные выводы

На основе выше приведенных данных, можно сказать что:

1. Наблюдается влияние выпадения ЕРР на концентрацию озона, оксида азота и гидроксильной группы в областях полярной атмосферы.
2. Влияние выпадения ЕРР на концентрацию озона и гидроксильной группы не выявлено в летний период.
3. Увеличение концентрации ОН и NO сопровождается падением содержания озона.
4. Сокращение концентрации озона вызванных выпадением ЕРР в среднем равняется 3.5%.
5. Установлена устойчивая связь между мощностью выпадения высокоэнергичных частиц в атмосфере и концентрациями атмосферных газов и соединений, в число которых входят озон, гидроксильная группа ОН и оксид азота.

Заключение

На основе проведенной работы, необходимо отметить, что несмотря на малый вклад в разрушении озона и образовании гидроксильной группы, влияние выпадения ЕРР, на газовый состав атмосферы и климат Земли, нельзя недооценивать и необходимо учитывать в различных климатических моделях. Установлена устойчивая связь мощность выпадения высокоэнергичных частиц и вариаций концентраций газов в атмосфере. В дальнейшем, планируется дальнейшая работа по изучению влияния выпадения ЕРР на другие газы атмосферы, расширения количества проанализированных явлений.

Литература

1. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 414 с.
2. А.А. Кривоуцкий, А.И. Репнев, «Воздействие космических факторов на озоносферу Земли», Москва ГЕОС 2009.
3. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 313–314.
4. Artamonov, A., Mironova, I., Kovaltsov, G., Mishev, A., Plotnikov, E. & Konstëantinova, N., 2017, «Calculation of atmospheric ionization induced by electrons with non - vertical precipitation: updated model CRAC-EPII». In : Advances in Space Research. 59, 9, p. 2295-2300
5. Callis L.B., Baker D.A., Blake J.B. Lambeth J.D., Boughner R.E., Natarajan M., Klebesadel R.W., Gorney D.J. Precipitating relativistic electrons: their long-term effect on stratospheric odd nitrogen levels // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, № D2. P. 2939–2976
6. Chapman S. A theory of upper atmospheric ozone // Mem. R. Meteorol. Soc. 1930. V. 3. P. 103–125
7. Jackman C.H., DeLand M.T., Labow G.J., Fleming E.L., Weisenstein D.K., Ko M.K.W., Sinnhuber M., Russell J.M. Neutral atmospheric influences of the solar proton events in October-November 2003 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, № A09S27; doi:10. 1029/2004JA010888
8. Makhmutov, V. S., Bazilevskaya, G. A., Stozhkov, Yu. I., Svirzhevskaya, A. K., Svirzhevsky, N. S., 2016, «Catalogue of electron precipitation events as observed in the long-duration cosmic ray balloon experiment», Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 149, p. 258-276.
9. Mironova, I. A., K. L. Aplin, F. Arnold, G. A. Bazilevskaya, R. G. Harrison, A. A. Krivolutsky, K. A. Nicoll, E. V. Rozanov, E. Turunen, and I. G. Usoskin (2015), Energetic particle influence on the Earth's atmosphere, Space Sci. Rev., 194, 1–96, doi:10.1007/s11214-015-0185-4.

10. Krivolutsky A.A., Kuminov A.A., Vyushkova T.Yu. Ionization of the atmosphere caused by solar protons and its influence on ozonosphere of the Earth during 1994–2003 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. V. 67. P. 105–117.
11. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006
12. Usoskin, I., and G. Kovaltsov (2006), Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications, *J. Geophys. Res.*, 111, D21206, doi:10.1029/2006JD007150
13. Schwabe H. // *Astron. Nahr.* 1843. Bd. 20, № 295.
14. Wolf R. // *Astron. Mitt. Zurich.* 1856. № 1. 8 p.
15. Hale G.E. Preliminary results of an attempt to detect the general magnetic field of the sun // *Astrophys. J.* 1913. V. 38. P. 27–98.
16. Waldmaier M. *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung.* Leipzig: Geest und Portig, 1955. 389 s.
17. Харгривс Дж.К. *Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи.* Л.: Гидрометеиздат, 1982. 352 с.